

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Bakalářská práce

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Horizontální krystalizátor laboratorní pece

Horizontal Crucible of Laboratory Smeltery

Student:

Martin Pustka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pustka,M. Horizontální krystalizátor laboratorní pece. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009,54 s.
Bakalářská práce, vedoucí Noga, Z.

Bakalářská práce se zabývá problematikou inovace horizontálního krystalizátoru laboratorní pece pro potřebu laboratoří FMMI na tavení a rafinaci neželezných kovů. Při zpracování konstrukčního návrhu jsem vycházel z jeho stávajícího provedení. V úvodu je zpracován požadavkový list, funkční, orgánová a stavební struktura horizontálního krystalizátoru. Následně je řešeno zabezpečení rovnoměrného, definovaného chlazení jeho teplosměnné plochy pomocí usměrňujících prvků. Vytvořená výkresová dokumentace je přílohou bakalářské práce.

ANNOTATION BACHELOR'S THESIS

Pustka,M. Horizontal Crucible of Laboratory Smeltery. Ostrava: Department of Production Machinery and Construction, Faculty of Mechanical Engineering
VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, 54 p.

Bachelor thesis, head: Noga,Z.

Bachelor's thesis deals with the horizontal crystalizer innovation of laboratory furnaces for laboratories FMMI to the need for melting and refining non-ferrous metals. During the processing of design I came out of its current implementation. The introduction processes requirements list, function, organ structure and construction of horizontal crystalizer. Subsequently, securing solution for defining even cooling of its surface using a heat regulatory elements. Created drawings annexed thesis.

Obsah bakalářské práce

| | |
|---|----|
| Seznam použitých symbolů a zkratk..... | 8 |
| 1 Úvod | 10 |
| 2 Typy plazmových pecí | 11 |
| 2.1 Třífázové pece s vyzděnou nístějí | 12 |
| 2.2 Plazmové pece s kovovými (vodou chlazenými) vertikálními krystalizátory | 12 |
| 2.3 Tavicí plazmové pece s vyzděnou nístějí | 13 |
| 2.4 Plazmové pece s kovovými horizontálními krystalizátory | 14 |
| 3 Základní fyzikálně chemické vlastnosti titanu a argonu | 15 |
| 3.1 Titan | 16 |
| 3.2 Argon..... | 16 |
| 4 Plazma | 17 |
| 4.1 Fyzikální vlastnosti a postata plazmatu | 17 |
| 4.2 Plazmový hořák pro přetavování čistých kovů..... | 18 |
| 5 Krystalizátor | 19 |
| 5.1 Základní druhy krystalizátorů..... | 19 |
| 5.2 Krystalizátor (forma) | 21 |
| 6 Transformační proces..... | 23 |
| 7 Požadavkový list..... | 25 |
| 7.1 Zadané požadavky | 25 |
| 7.2 Moje vyspecifikované požadavky | 25 |
| 8 Funkční požadavky..... | 25 |
| 8.1 Funkční vlastnosti | 26 |
| 8.2 Konstrukční vlastnosti | 26 |
| 8.3 Diagnostické funkce | 26 |
| 8.4 Řídící funkce | 26 |
| 9 Funkční a orgánová struktura..... | 27 |
| 9.1 Funkční struktura..... | 27 |
| 9.2 Orgánová struktura..... | 28 |
| 10 Morfologická matice | 29 |
| 11 Teplotní návrh zatížení krystalizátoru | 30 |
| 11.1 Tepelná bilance plazmové pece | 30 |
| 11.2 Výpočet zatížení krystalizátoru tepelným tokem..... | 31 |

| | | |
|------|---|----|
| 12 | Výpočet chlazení krystalizátoru..... | 33 |
| 12.1 | Výpočet hydraulického průměru krystalizátoru..... | 33 |
| 12.2 | Součinitel přestupu tepla..... | 36 |
| 12.3 | Základní bilanční rovnice..... | 38 |
| 12.4 | Kontrola chlazení..... | 39 |
| 13 | Učení tlakových ztrát v krystalizátoru..... | 40 |
| 13.1 | Třecí ztráty..... | 40 |
| 13.2 | Místní ztráty..... | 42 |
| 14 | Určení tloušťky stěny krystalizátoru..... | 44 |
| 15 | Pájení mědi..... | 45 |
| 16 | Diagnostika účinků chlazení krystalizátoru..... | 46 |
| 16.1 | Snímač průtoků..... | 46 |
| 16.2 | Teplotní čidlo..... | 47 |
| 17 | Závěr..... | 48 |
| | Seznam použité literatury..... | 49 |
| | Seznam příloh..... | 51 |

Seznam použitých symbolů a zkratek

| | | |
|-----------|---|----------------------|
| A | Koeficient | $[-]$ |
| C | Součinitel závislý na teplotě vody | $[-]$ |
| C_0 | Součinitel vyzařování absolutně černého tělesa | $[W.m^{-2}.K^{-4}]$ |
| D_0 | Průměr oblouku pece | $[m]$ |
| D | Vnitřní průměr trubky | $[m]$ |
| L | Délka | $[m]$ |
| L_O | Délka oblouku pece | $[m]$ |
| L_K | Délka chladicího kanálu | $[m]$ |
| D_{hK} | Hydraulický průměr krystalizátoru | $[m]$ |
| N_U | Nuseltovo kritérium | $[-]$ |
| P | Tepelný výkon | $[W]$ |
| P_R | Prandtlovo kritérium stanovené pro teplotu kapaliny | $[-]$ |
| P_{RS} | Prandtlovo kritérium stanovené pro teplotu stěny | $[-]$ |
| Q_{12} | Tepelný tok | $[W]$ |
| R_E | Reynoldsovo kritérium | $[-]$ |
| R_M | Mez pevnosti | $[MPa]$ |
| S_1 | Plocha zářiče | $[m^2]$ |
| S_K | Obsah krystalizátoru | $[m^2]$ |
| S_P | Plocha stěny pece | $[m^2]$ |
| S_Z | Plocha plazmového oblouku | $[m^2]$ |
| T_1 | Teplota plazmového oblouku | $[K]$ |
| T_2 | Teplota vnitřní stěny pece | $[K]$ |
| a | Rozměr stěny krystalizátoru | $[m]$ |
| a_H | Strana čtverce tavné lázně | $[m]$ |
| b | Rozměr stěny krystalizátoru | $[m]$ |
| c | Rozměr stěny krystalizátoru | $[m]$ |
| c_{PV} | Měrná tepelná kapacita vody za stejného tlaku | $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| c_V | Přídavek na korozi a výrobu | $[-]$ |
| d | Rozměr stěny krystalizátoru | $[m]$ |
| e | Rozměr stěny krystalizátoru | $[m]$ |
| $h_{t,m}$ | Ztrátová výška | $[m]$ |

| | | |
|------------------|--|--------------------------------------|
| \dot{m} | Hmotnostní tok vody | [kg.s ⁻¹] |
| n | Koeficient | [-] |
| n_{BN} | BezpečnostKoeficient | [-] |
| o_K | Obvod krystalizátoru | [m] |
| Δp_{tr} | Třecí tlakové ztráty | [Pa] |
| Δp_Z | Celkové tlakové ztráty | [Pa] |
| Δp_{ZM} | Místní tlakové ztráty | [Pa] |
| s_R | Tloušťka stěny pláště | [mm] |
| $\Delta \bar{t}$ | Střední logaritmický rozdíl teplot | [°C] |
| t_1 | Maximální teplota vody | [°C] |
| t_2 | Maximální teplota stěny krystalizátoru | [°C] |
| t_{ST} | Teplota povrchu stěny chladícího kanálu | [°C] |
| Δt_V | Rozdíl teplot na vstupu a výstupu | [°C] |
| t_{VS} | Teplota vstupní chladící vody | [°C] |
| t_{VY} | Teplota výstupní chladící vody | [°C] |
| w | Rychlost proudění vody | [m.s ⁻¹] |
| α_K | Součinitel přestupu tepla | [W.m ⁻² .K ¹] |
| ε_n | Sožená emisivita (plazmový zářič - stěna krystalizátoru) | [-] |
| ε_p | Emisivita měděného krystalizátoru | [-] |
| ε_Z | Emisivita zářiče | [-] |
| η | Dynamická viskozita | [Pa.s] |
| λ | Součinitel prostupu tepla vody | [m ² .s ⁻¹] |
| λ | Součinitel tření | [-] |
| ν | Kinematická viskozita vody | [W.m ⁻¹ .K ¹] |
| ρ_V | Hustota vody | [kg.m ³] |
| φ_p | Úhlový součinitel záření stěny pece | [-] |
| φ_P | Součinitel svaru | [-] |
| φ_Z | Úhlový součinitel zářiče | [-] |
| ζ | Součinitel místní ztráty | [-] |

1 Úvod

Laboratoř katedry neželezných kovů, rafinace a recyklace FMMI VŠB-TU Ostrava pro potřebu materiálového výzkumu používá od 70. let laboratorní plazmovou pec s vodou chlazeným měděným horizontálním krystalizátorem. Princip spočívá v přetavování kulovitěho práškového výchozího materiálu o hmotnosti do 1 kg. Plazmové pece s horizontálními krystalizátory využívají principu pásmového tavení. Jako zdroj tepla je použit plazmový hořák. Tyto děje probíhají v zařízení zvaném krystalizátor.

V krystalizátoru dle literatury [2] lze použít výchozí materiál s menšími nároky na předběžnou úpravu jeho formy a homogenity. Můžeme přetavovat práškovitý nebo kusovitý výchozí materiál. Konstrukce je uzpůsobena reverzi směru pohybu krystalizátoru a tím i několikanásobné přetavení vsázky v jednom pracovním cyklu. V ingotu tímto způsobem dosáhneme vysoké chemické homogenity. Typ laboratorní pece na FMMI VŠB-TU Ostrava umožňuje protavení jen malé hloubky materiálu. Z toho důvodu ji nelze použít pro větší objemy vsázky – průmyslové účely.

Základní podmínkou nově vznikající fáze v krystalizátoru je termodynamická stabilita. Nově vznikající fáze musí být termodynamicky stabilní. tj. její volná entalpie musí být nižší než u fáze předchozí. Při přechodu tekuté fáze v tuhou je třeba určitého přechlazení při němž je rozdíl volných entalpií obou fází dostatečně velký, aby mohlo dojít ke krystalizaci i přes vznikající latentní teplo. Spontánní krystalizace vzniká buď na samostatně vytvořených zárodcích uvnitř přechlazené taveniny. Jde o tzv. homogenní nukleaci, při níž je vznik trvalých krystalů podmíněn jejich nadkritickou velikostí a tepelnými fluktuacemi v tavenině. Tento způsob krystalizace je možný jen za speciálních laboratorních podmínek při velkém přechlazení. Heterogenní krystalizace odpovídá podmínkám krystalizace slévárenských slitin v praxi. Nutnou podmínkou je, aby v krystalizující tavenině byly obsaženy vhodné příměsi cizích látek (oxidy, siřičky, nitridy, křemičitany apod.), které by měly určitou příbuznost k mřížce budoucího krystalu. Čím větší je tato příbuznost, tím menší energie je třeba ke vzniku krystalického zárodku.

Transformace tvarově nedefinovaného kontislitku na kontislitek tvarově definovaný - kruhového, čtvercového či obdélníkového průřezu je možná prostřednictvím technického systému plazmové pece s vertikálním krystalizátorem.

2 Typy plazmových pecí [2]

Příprava kovových materiálů v plazmových pecích má proti konvenčním pecím řadu výhod.

- zamezení znečištění kovu uhlíkem z grafitových elektrod v obvyklých obloukových pecích
- možnost použití inertní atmosféry, čímž se zamezí naplynění kovu dusíkem a vodíkem ze vzduchu
- nízkoteplotní plazma může být vytvářena z libovolné směsi plynů, což umožňuje použití volitelné, přesně kontrolované, oxidační, redukční nebo inertní atmosféry
- podmínky pro odplynění kovu v plazmových pecích s neutrální atmosférou se blíží podmínkám vytvářeným při tavení ve vakuových pecích, protože parciální tlaky kyslíku, dusíku a vodíku v plazmových pecích s inertní atmosférou jsou velmi nízké
- tavení v plazmových pecích s atmosférickým tlakem se vyznačuje nízkým odpařováním složek taveniny, na rozdíl od vakuových obloukových nebo indukčních pecí
- pomocí plazmových hořáků lze dosáhnout vysokých a dobře regulovatelných teplot
- vysoká koncentrace energie v malém objemu a velmi rychlý přenos tepla na ohříváný materiál zajišťují vysokou rychlost tavení a malé ztráty vyzařováním
- konstrukce plazmových pecí je ve srovnání s konvečními vakuovými pecemi jednodušší

Základní typy konstrukcí plazmových pecí:

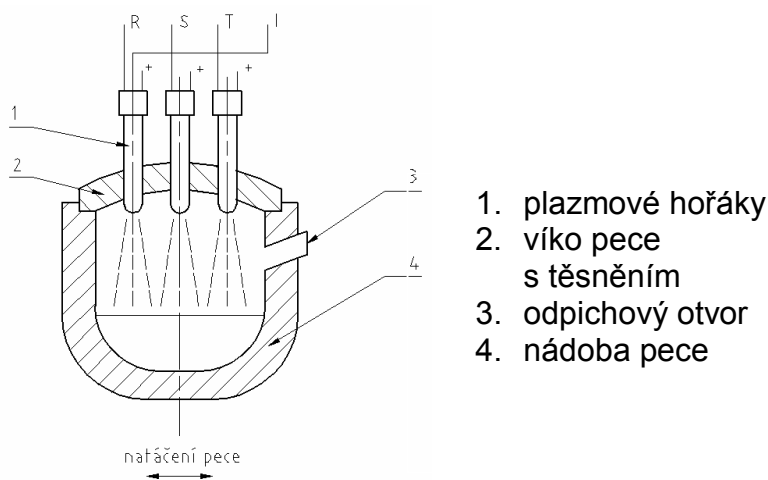
Prvním typem jsou plazmové pece založené na konstrukci běžných obloukových pecí, pouze s tím rozdílem, že místo elektrod je použit plazmový hořák (případně několik hořáků), a na vsázku se proud přivádí pomocí půdní elektrody. Vnitřní prostor pecí je obvykle proveden jako vakuově těsný, což umožňuje pracovat s inertní atmosférou. Tyto pece mohou být vybaveny zařízením pro elektromagnetické míchání kovu.

Druhým typem jsou plazmové pece s kovovými vodou chlazenými krystalizátory. Tyto pece pracují většinou s atmosférickým tlakem, výjimečně se používá vakuum nebo přetlak. Jejich použití je spíše v oblasti laboratorních a zkušebních zařízení. Výhoda proti prvnímu typu spočívá v tom, že ingoty nepřicházejí

do styku s nístějí, což má za následek nejen jejich čistotu, ale umožňuje to tavení kovů, jejichž teploty tání převyšují pracovní teploty běžných žáruvzdorných materiálů. To však souvisí s nevýhodou horší tepelné bilance, způsobené intenzivnějším odvodem tepla z lázně i z komory pece vodním chlazením

2.1 Třífázové pece s vyzděnou nístějí [2]

Zařízení, které pracuje s nezávislým obloukem, odstraňuje nutnost použití půdní elektrody pro přívod proudu na vsázku. Tato konstrukce pracuje s třífázovým proudem, který se přenáší na vsázku plamenem plazmatu. Na každý hořák se přivádí pomocný stejnosměrný proud pro vytvoření řídicího oblouku, který hoří mezi katodou a tryskou hořáku. Každá tryska je připojena na jednu fázi zdroje. Proud prochází z jedné elektrody na druhou plamenem plazmatu a lázní taveného kovu. K ohřevu vsázky se teda využívá kromě přenosu tepla obloukem i Jouleův efekt, což má příznivý vliv na účinnost ohřevu.

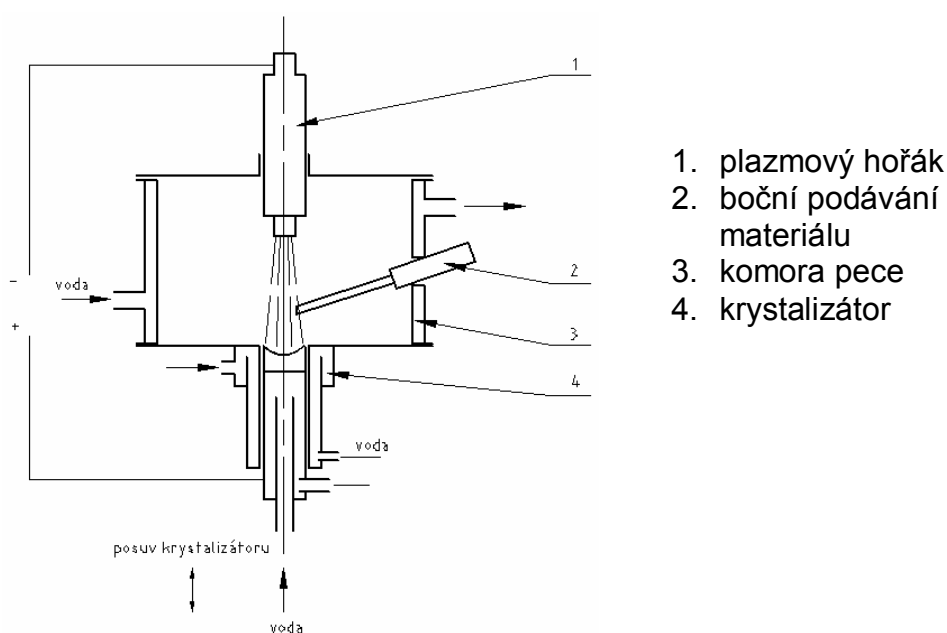


obr.1 - schéma třífázové plazmové pece s vyzděnou

2.2 Plazmové pece s kovovými (vodou chlazenými) vertikálními krystalizátory [2]

Jsou konstruovány buď s jedním centrálně (v ose pece) umístěným plazmovým hořákem a bočním podáváním materiálu (tehdy musí být podáváný materiál ve formě tyče), nebo s více hořáky umístěnými bočně (kolem osy pece, a centrálním podáváním materiálu-tehdy lze tavit i sypké materiály). Vlastní pec tvoří tavící komora a krystalizátor, obojí chlazené vodou. Pouhou výměnou krystalizátoru lze v jedné peci

vyrábět ingoty o průřezu kruhovém, čtvercovém, pravoúhelníkovém i jiných tvarů, včetně dutých, z jediného průřezu podávaného materiálu. Podávání materiálu je řešeno tak, aby se materiál nejen posouval směrem do plamene, ale zároveň i otáčel kolem své os, což zlepšuje homogenitu lázně i výsledného ingotu. Míchání lázně je zajištěno nestejným teplotním polem, které vzniká v lázni ve vodou chlazeném krystalizátoru s intenzivním odvodem tepla. Pod pecí je umístěno zařízení na vytahování ingotu z krystalizátoru. Jako plazmotvorný plyn se používá argon nebo jeho směs s dalšími plyny, pece mohou být vybaveny zařízením na čištění a recirkulaci plynů.

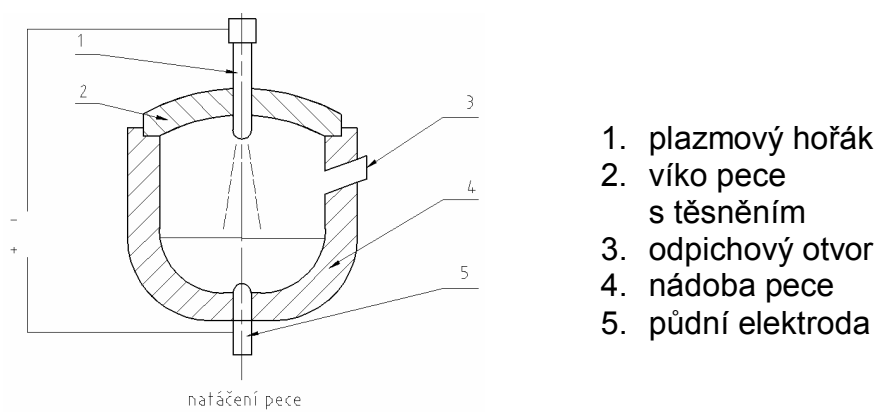


obr.2 - schéma plazmové pece s vertikálním

2.3 Tavicí plazmové pece s vyzděnou nístějí [2]

Jedná se o nádobu vyzděnou žáruvzdorným materiálem. Tvar i materiály použité na vyzdívku pracovního prostoru jsou stejné jako u konvekčních obloukových pecí. Na dno se zaváží vsázka, která tvoří anodu, na kterou se proud přivádí půdní elektrodou. Sázet se může ručně, sázecím žlabem nebo košem (podle velikosti pece). Nádoba se uzavírá víkem, kterým prochází jeden nebo několik plazmových hořáků (podle velikosti pece). Víko je buď odnímatelné, nebo hydraulicky zvedané (záleží opět na velikosti pece). Hořáky mají nastavitelnou vzdálenost od lázně. Ve vyzdívce bývá zabudována cívka pro elektromagnetické míchání kovu, které je důležité proto, aby se kov v oblasti anodové skvrny (dopadu oblouku) nepřehříval a nevypařoval, a

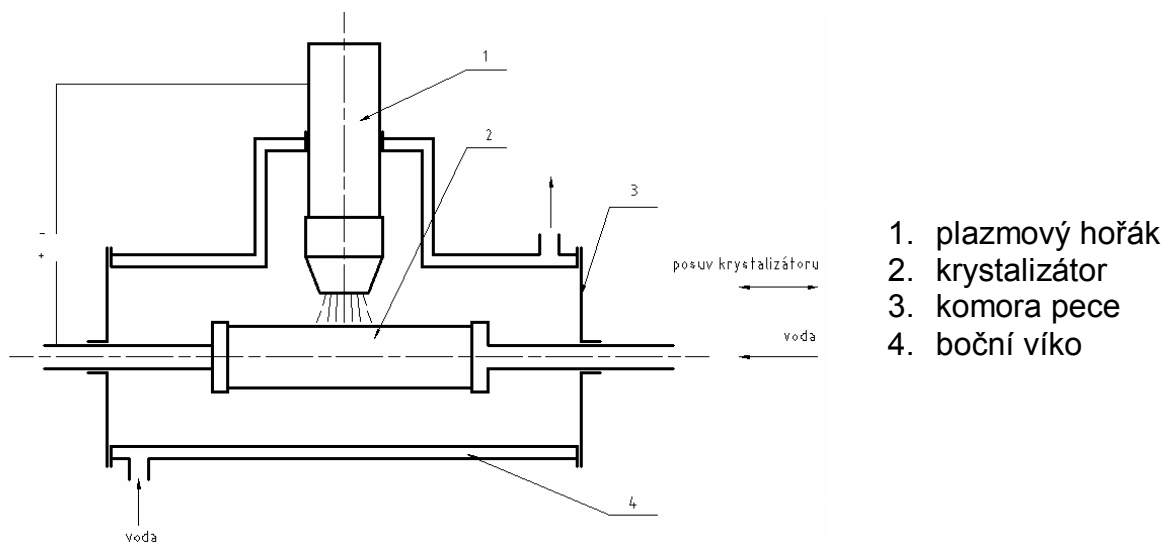
dále aby byla zajištěna chemická homogenita lázně, neboť samotný tlak obloukového plazmatu je na dokonalé promíchání příliš slabý. Plazmový hořák je napájen stejnosměrným proudem. Pro stabilizaci oblouku a zároveň pro vytvoření inertní atmosféry se používá nejčastěji argon. Po tavně se pec elektromechanicky nebo hydraulicky naklápí na stranu odpichového otvoru, který musí být během tavnby vzduchotěsně zakrytý z důvodu udržení inertní atmosféry. Dále může být pec vybavena nahlížením otvorem, případně pro přidávání legur, stahování strusky apod.



obr.3 - schéma plazmové pece s vyžděnou nístějí a půdní elektrodou

2.4 Plazmové pece s kovovými (vodou chlazenými) horizontálními krystalizátory [2]

Tento typ odstraňuje nevýhodu spočívající v nutnosti poměrně složité předběžné úpravy vsázky do stavu, kdy je možno materiál přesně dávkovat do oblasti tavení, a problémech s nerovnoměrností chemického složení výsledných slitin, které plynou z principu tavení ve vertikálních krystalizátorech. Pec se skládá z tavní komory a krystalizátoru, obojí je chlazeno vodou. Krystalizátor je vybaven jednoduchým zařízením pro posuv pomocí pohybového šroubu. Plazmový hořák je umístěn kolmo nad krystalizátorem. Plazmotvorné plyny se používají stejné jako u předešlých typů. Při použití čistého argonu se použitý plyn čistí, při použití směsí plynů se použitá směs odvádí



obr.4 - schéma plazmové pece s horizontálním krystalizátorem

3 Základní fyzikálně chemické vlastnosti titanu a argonu

Titan, chemická značka Ti

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| Atomové číslo | 22 |
| Relativní atomová hmotnost | 47,867 amu |
| Hustota | 4,506 g/cm ³ |
| Teplota tání | 1668 °C, 1941 K |
| Teplota varu | 3287 °C, 3560 K |
| Tvrdość | 6,0 v Mohsově stupnici tvrdosti |

Argon, chemická značka Ar

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| Atomové číslo | 18 |
| Relativní atomová hmotnost | 39,948 amu |
| Hustota | 1,784 g/cm ³ |
| Teplota tání | -189,4 °C, 83,8K |
| Teplota varu | -184,9°C, 87,3K |
| Tvrdość | 6,0 v Mohsově stupnici tvrdosti |

3.1 Titan

Dle literatury [14] je titan šedý až stříbřitě bílý, lehký a tvrdý kov. Je dobrým vodičem tepla i elektřiny. Má mimořádnou chemickou stálost – je netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Rozpouští se zvolna v HCL, naopak kyselina dusičná jeho povrch pasivuje. Pro jeho rozpouštění je nejúčinnější kyselina fluorovodíková HF nebo její směs s jinými minerálními kyselinami. Za zvýšených teplot však titan reaguje s většinou nekovů, například s vodíkem, kyslíkem, dusíkem, uhlíkem, borem, křemíkem, sírou a halogeny. Praktické využití elementárního titanu vyplývá především z jeho mimořádné chemické odolnosti a malé hustoty. Je přitom třeba vzít v úvahu, že výroba titanu je v současné době relativně značně finančně náročná a provozní nasazení titanových komponentů je účelné pouze v případech, kdy není možno použít levnější alternativu na bázi slitin hliníku a hořčíku – duralů.

3.2 Argon

Argon je bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu, mimořádně chemicky netečný plyn, protože jeho valenční elektrony zcela zaplňují valenční orbitály 3s a 3p a znemožňují tak reakci s jinými prvky. Argon stejně jako ostatní vzácné plyny má malý elektrický odpor a vede velmi dobře elektrický proud. Díky tomu v uzavřených trubicích, kterými prochází elektrický proud, vznikají elektrické výboje. Toho se využívá v osvětlovací technice. Argon září při větší koncentraci červeně, při nižších přechází přes fialovou a modrou až k bílé barvě.

Využití:

Inertních vlastností argonu se využívá především při svařování kovů, kde tvoří ochrannou atmosféru kolem roztaveného kovu a zabraňuje vzniku oxidů a nitridů a tím zhoršování mechanických vlastností svaru.

V metalurgii se ochranná atmosféra argonu nasazuje při tavení slitin hliníku, titanu, mědi, platinových kovů a dalších.

Růst krystalů superčistého křemíku a germania pro výrobu polovodičových součástek pro výpočetní techniku se uskutečňuje v atmosféře velmi čistého argonu.

4 Plazma

4.1 Fyzikální vlastnosti a postata plazmatu

Dle literatury [2] je možné libovolnou látku přivést do plynného skupenství. Je-li teplota takového plynu dostatečně vysoká, začnou molekuly plynu (jedná-li se o plyny molekulární jako např. H_2 , N_2 nebo O_2) disociovat, tj. rozpadají se na jednotlivé atomy. Atomy disociovaného plynu vykonávají pak neuspořádaný pohyb, při němž dochází ke vzájemným srážkám mezi nimi. Stupeň ionizace závisí nejen na teplotě, ale i na hustotě, proto je ionizace plynu vyjádřena počtem iontů a neutrálních atomů v 1 cm^3 rovným $7 \cdot 10^{16}$.

Při ionizaci plynu za vysokých teplot se uplatňují různé procesy vzájemného působení mezi jednotlivými atomy i jednotlivými ionty, elektrony a světelným zářením.

Prakticky se látky v laboratorních podmínkách i v technice přivádějí do stavu plazmatu různými způsoby elektrického výboje v plynech. Při elektrickém výboji prochází plynem elektrický proud. Nositeli tohoto proudu jsou elektrony a ionty, jejichž působením dochází k ionizaci plynu. Sám proces ionizace je nerozlučně spjat s tokem proudu, díky němuž vznikají nové elektrony a ionty, v důsledku čehož se udržuje stupeň ionizace na určité úrovni.

Plazma plynného výboje není v tepelné rovnováze. Její vnitřní část je vlivem procházejícího proudu ohřívána a její povrchové části jsou ochlazovány stykem s povrchem výbojových komůrek nebo se studeným plynem, se kterým přichází do kontaktu.

Plazma, vznikající při intenzivních plynných výbojích může mít mnohonásobně vyšší teplotu než kov, sklo nebo jiný neutrální plyn, který je obklopuje.

Plazma je termicky nerovnovážné i v jiném směru, plazma totiž sestává z několika komponent o různých teplotách. Jednou z těchto komponent jsou elektrony, druhou kladné ionty a třetí neutrální atomy. Tyto komponenty vytváří mezi sebou směs podobně jako plyny, avšak na rozdíl od obyčejné plynné směsi kde všechny částice, které nezávisle na jejich příslušnosti k té či oné složce mají stejnou střední kinetickou energii neuspořádaného tepelného pohybu elektronů, iontů a neutrálních atomů plazmatu plynného výboje, je střední kinetická energie částic plazmatu různá. Elektrony jak je známo mají značně vyšší energie než ionty a kinetická energie iontů

může značně převyšovat energii neutrálních atomů a molekul. Proto je možno říci, že plazma představuje směs komponent s různými teplotami.

4.2 Plazmový hořák pro přetavování čistých kovů

Pro přetavování čistých kovů o vysokém bodu tání byl na VŠB — Katedře neželezných kovů sestaven plazmový hořák, umožňující jejich přetavování v atmosféře inertního plynu. V článku je podána stručná charakteristika typů plazmových hořáků pracujících v různém elektrickém zapojení a porovnání parametrů plazmového hořáku katedry neželezných kovů s parametry hořáků popsanych v literatuře. Použitím katody ze stejného materiálu jako tavený kov, pracující v elektrickém zapojení, které umožňuje použití materiálu katody o nižším bodu tání nežli je bod tání W , je možno přetavovat kovy s minimálním znečištěním.

Čisté kovy se dle literatury [2] vyznačují zvýrazněnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi jako např. maximální elektrickou vodivostí, magnetickou prostupností, odolností proti korozi, tvářitelností a vykazují minimální mez tečení a pevnosti. Výjimečně nízké pevnostní hodnoty, charakteristické pro většinu čistých kovů způsobují, že tyto materiály jsou zřídka používány tam, kde je požadována jako prvořadá vlastnost — odolnost proti silovému napětí.

Zvýrazněné fyzikální vlastnosti čistých kovů jsou však stále více požadovány v rozvíjející se moderní technice a široce rozvětvených fyzikálních výzkumech v oblasti atomového jádra, jež jsou neobyčejně náročné právě na stupeň čistoty kovů. Kovy používané pro tyto účely (ať už jako suroviny pro jaderné palivo nebo konstrukční a technologické materiály) musí mít vzhledem k některým příměsím značně vysoký stupeň čistoty, který je starými, dávno známými metodami nedosažitelný. Ještě vyšší nároky na čistotu kovů má polovodičová technika, kde je čistota materiálů existenčním požadavkem pro současnou radiotechniku a elektroniku. Konečně nejsou čisté kovy nahraditelné ani při výrobě nových, korozi-vzdorných a žárupevných slitin, na nichž je závislý další rozvoj letectví, raketové aj. moderní techniky.

Čisté kovy v mnoha případech není možno použít v takové vnější a strukturní formě, v jaké byly vyrobeny. Mnoho kovů s vyšším bodem tání bývá dosud získáváno v podobě prášku. V mnohých případech jejich použití je možno vystačit s výrobky získanými metodami práškové metalurgie. Pro mnohé účely je však nutno dát čistým

kovům vlastnosti, které je možno získat jen jejich přetavením. Pak je nutno uvážit volbu vhodného způsobu tavení, který by již získanou čistotu nesnížil.

Způsob přetavování je nutno posuzovat s ohledem na znečištění vměsky, reaktivnost kovu s prostředím ve kterém se nachází a s ohledem na teploty potřebné k jeho roztavení. U většiny nízkotavitelných kovů není volba nereaktivního prostředí nezpůsobujícího znečištění vměsky nijak zvlášť obtížná.

U kovů s vyšším bodem tání zbývá (vynecháme-li speciální laboratorní způsoby tavení bez dotyku) v tomto bodě prakticky jediná možnost, a to tavení v kovové, vodou chlazené kokile (krystalizátoru), ve vakuu nebo v atmosféře inertního plynu.

Vzhledem k tavícím teplotám jednotlivých kovů a velkým tepelným ztrátám, je nutno vždy volit zdroj tepla tak, aby byl schopen přetavit dané kovy s určitou rezervou výkonu.

Plazmové pece, které se s výhodou používají rovněž pro výrobu kovů a slitin s teplotou tavení nad 2000 °C nevyžadují oproti elektronovým pecím vakuum, ale naopak pracují s mírným přetlakem používaného plynu.

5 Krystalizátor

Krystalizátor je základní technologická součást ZPO (Závod plynulého odlévání). Svou funkcí zajišťuje odvod tepla z tuhnoucí oceli a tím tvorbou utuhlé kůry, která musí eliminovat ferostatický tlak tekuté oceli. Tekutá ocel vzniká tavením práškových kovů pomocí plazmy. Oblast chlazení předlitku v krystalizátoru se nazývá primární oblastí a vyznačuje se přenosem tepla vedením, konvencí a sáláním. Z oceli se v něm odvádí relativně největší množství tepla za jednotku času. Krystalizátor je ve většině případů chlazen vodou, proudící vevnitř měděné trubky.

5.1 Základní druhy krystalizátorů

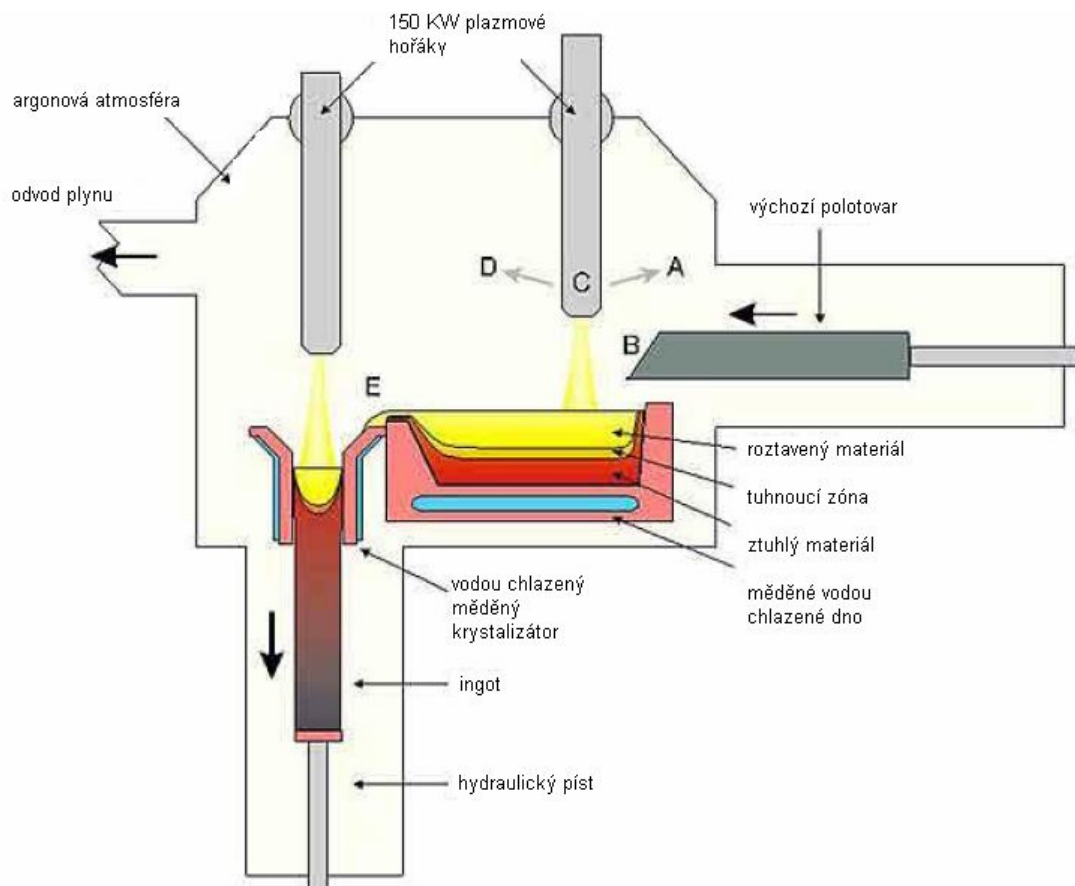
Krystalizátory lze dělit z několika hledisek.

- Podle tloušťky stěny - krystalizátory tenkostěnné (do 20 mm) a tlustostěnné (nad 20 mm). Nejčastěji používané tloušťky se pohybují v rozmezí 2 až 25 mm. Vyskytnout se mohou ale až 50 mm.
- Podle konstrukce - na blokové, trubkové a deskové. Toto dělení se jeví jako základní a používá se nejčastěji

- Podle průřezu - krystalizátor může být obdélníkový, čtvercový, mnohoúhelníkový, kruhový, polokruhový a profilový

Rozhodujícím faktorem, který ovlivňuje tuhnutí předlitků i dalších parametrů spojitého odlévání oceli je tepelný tok v krystalizátoru a teplota povrchu předlitku. Krystalizátor musí zabezpečit intenzivní odvod tepla od chladnoucího tekutého kovu a zabezpečit jeho přechod z tekuté do tuhé fáze.

Jelikož mým úkolem je se zabývat inovací horizontálního krystalizátoru laboratorní pece nemohu porovnat a zhodnotit s podobnými zařízeními. Jedná se o specifické zařízení, které je vyráběno jen v kusově. Ve světě se vyskytují více vertikální krystalizátory. Jedno takové zařízení můžeme nalézt na univerzitě v Birminghamu. (obr.5). Toto zařízení má obdobné vlastnosti jaké jsou projektovány na katedře neželezných kovů FMMI VŠB-TU Ostrava. Odlišuje se jen ve výkonu plazmového hořáku, ten je 150 KW a postupu tavení ingotu. U této pece dojde nejprve k natavení suroviny do měděného ohniště a až poté putuje tavenina do předem tvarově definovaného krystalizátoru



obr.5: Laboratorní plazmová pec v Birminghamu [3]

Další způsob využití vertikálního krystalizátoru je u plynulého odlévání ocelových sochorů. Plynulé odlévání oceli je moderní a progresivní technologie výroby oceli, jejímž produktem je předlitek jako polotovary k dalšímu zpracování. V České republice je produkce plynule odlévané oceli rozdělena na produkci bram (polotovary pro výrobu plechů) a sochorů (polotovary pro výrobu tyčových a drátových polotovarů). Bramy jsou produkovány v podnicích EVRAZ VÍTKOVICE STEEL a.s. a ArcelorMittal Ostrava a.s., kdežto sochory jsou produkovány zejména v Třineckých železárnách a.s. a v ArcelorMittal Ostrava a.s. Problematika plynulého odlévání sochorů je tedy v České republice velice aktuální.

5.2 Krystalizátor (forma) [4]

Hlavní funkcí krystalizátoru je zajistit ztuhnutí povrchové skořepiny takové tloušťky a pevnosti, aby udržela obsah tekutého jádra při vstupu proudu do sekundární zóny chlazení. Klíčovými prvky jsou tvar, tloušťka skořepiny, stejná teplota skořepiny při posuvu, a to vše bez vnitřních i povrchových vad s minimální pórovitostí a s malým počtem nekovových vměstků. Krystalizátor je otevřený krabicový objekt, do jehož stěn jsou zabudovány vodní chladicí kanály. Krystalizátor je vyroben z velmi čisté měděné slitiny. Stěny krystalizátoru chlazené vodou odvádí teplo z tuhnoucí oceli. Vnitřní pracovní povrch měděných desek obsahuje chrom nebo nikl, aby povrch dosáhl patřičné tvrdosti. Je třeba zabránit otěru mědi do povrchu ocelového proudu, který by mohl být příčinou povrchových trhlin na výrobcích. Definice přenosu tepla mezi předlitem a krystalizátorem, jako jedné z okrajových podmínek, je složitý a při tom klíčový problém. Matematické a počítačové modely jsou zatíženy mnohými obtížně definovatelnými okrajovými podmínkami, jako je tato, ale i tak mohou napomáhat analýze procesů v krystalizátoru.

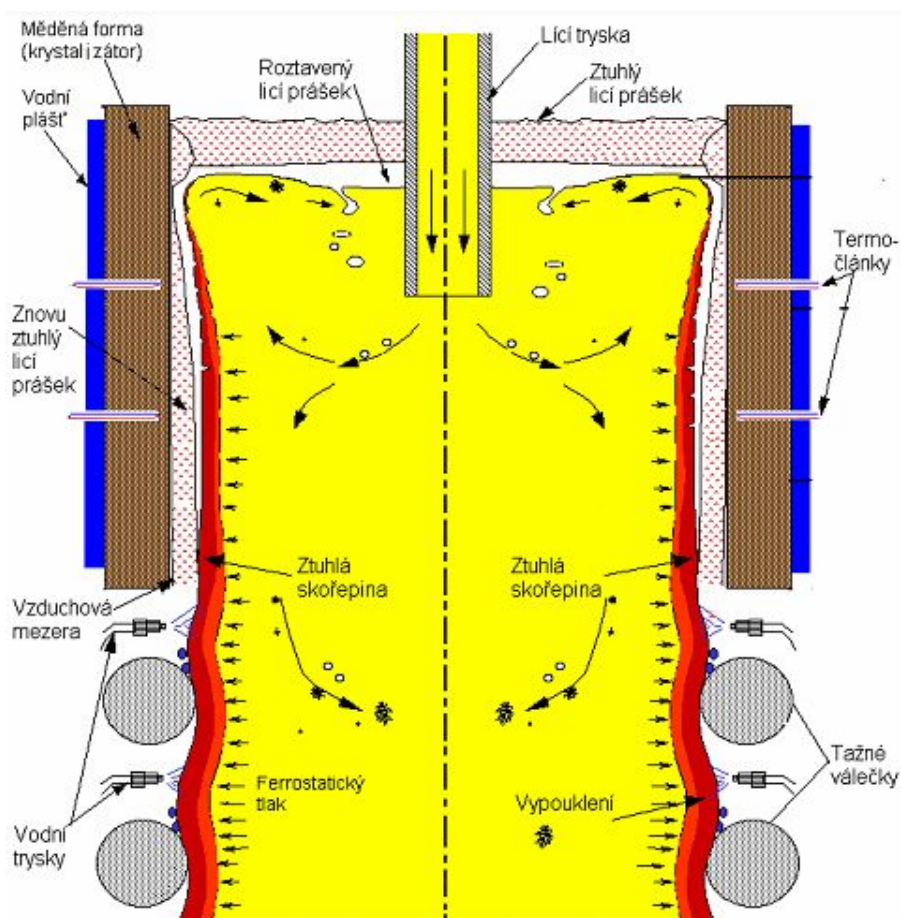
Hladina oceli v krystalizátoru je pokryta souvislou vrstvou licího prášku, který se taví a stéká po stěnách krystalizátoru. Dvě hlavní funkce licího prášku jsou krytí hladiny před oxidací a mazání styčných ploch na povrchu vzniklé licí kůry a na pracovní stěně krystalizátoru.

Chlazení předlitku v krystalizátoru je kombinací přenosu tepla konvekcí, vedením i sáláním. V krystalizátoru se z předlitku odvádí z celého ZPO relativně největší množství tepla za jednotku času, a to 10 až 30 % veškerého tepla. Krystalizátor je ve většině případů chlazen vodou, proudící ve frézovaných drážkách

nebo vrtaných kanálech desek, nebo je konstruován jako trubkový a je po celém svém vnějším povrchu omýván vodou.

V horní části krystalizátoru, kde je v přímém styku tekutá ocel, se intenzivně odvádí teplo z taveniny a vzniká ztuhlá, tzv. licí kůra-skořepina. Její tloušťka postupně narůstá, klesá její povrchová teplota a dochází k jejímu smršťování. Vzniklá spára se vyplní lubrikantem, který je-li práškový, se roztaví, v nižších částech krystalizátoru zase ztuhne a mezerou vypadává. Smrštěním předlitku a účinkem lubrikantu se zhoršuje přenos tepla a dochází dokonce k reohřevu kůry. Kůra se vlivem ferrostatického tlaku prohýbá zpět k desce krystalizátoru. Do vzniklých trhlin ve vrstvě již ztuhlých dendritických krystalů znovu vniká tekutá ocel. Konečně v dolní části krystalizátoru je kůra natolik pevná, že udrží ferrostatický tlak a mezera mezi kůrou a deskou krystalizátoru, kterou vypadl natuhlý licí prášek, se vyplní plynem.

Přenos tepla probíhá jednotlivými vrstvami, jak dokresluje obr. 6, které vytvářejí celkový odpor proti přenosu tepla, který lze chápat jako součet jednotlivých seriově řazených odporů.



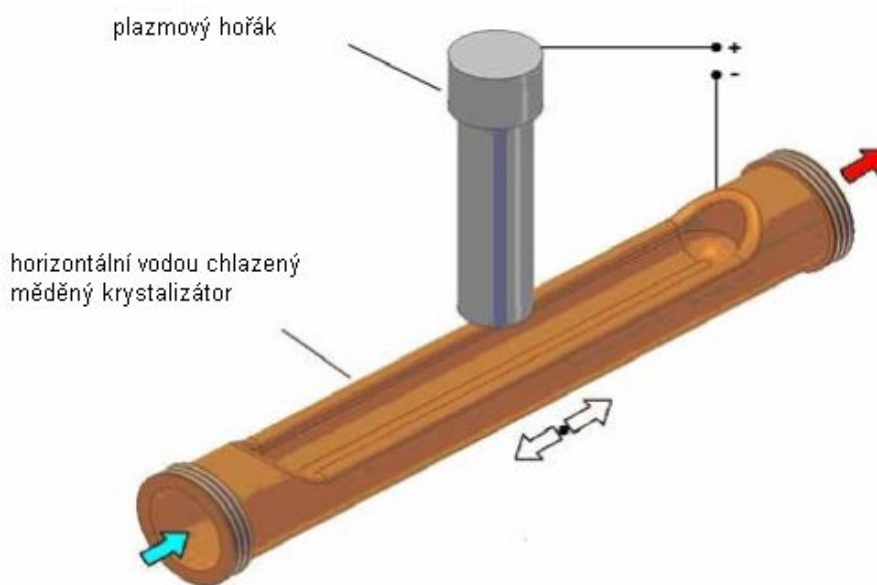
obr.6 : Schéma činnosti krystalizátoru a základní pojmy [4]

Oscilace krystalizátoru je nutná pro minimalizaci tření mezi natuhlou skořepinou a pracovním povrchem krystalizátoru, zabraňuje přetržení skořepiny a výtoku tekuté oceli (tzv. průval). Tření je též snižováno již zmíněným lubrikantem, jako jsou oleje nebo licí prášky. Oscilace o frekvenci řádově jednotek Hz jsou vybuzovány hydraulicky nebo motoricky přes vačky nebo páky. Oscilace nejsou symetrické (negativní obrat), pohyb dolů je rychlejší. Cykly oscilací krystalizátoru mají různou frekvenci, rázy a tvary. Ve skořepině tak může vznikat tlakové napětí a zmenšovat tahové napětí s předpokladem, že povrch bude bez trhlin a pórovitosti.

6 Transformační proces

Dle [4] je cílem každé transformace dosažení určitého stavu objektu transformace. Objektem transformace je objekt jež je nám k dispozici a je vstupem transformačního procesu. Změny stavu objektu transformace se dosáhne technologií, jejíž účinky jsou na objekt dodávány prostřednictvím faktorů: člověk, technický systém, vědění, řízení a okolí (místo a čas) .

Stávajícím objektem transformace je tedy od 70 let zkoumaný materiál, jež je na vstupu do transformačního procesu v sypké formě jejíž změny do formy tuhé se dosahuje plazmovou technologií, jejíž účinky jsou materiálu dodávány prostřednictvím technického systému - plazmové pece s horizontálním vodou chlazeným měděným krystalizátorem. Konstrukční princip je znázorněn na obr.7



obr.7 : Schéma horizontálního měděného krystalizátoru v laboratořích FMFI [1]

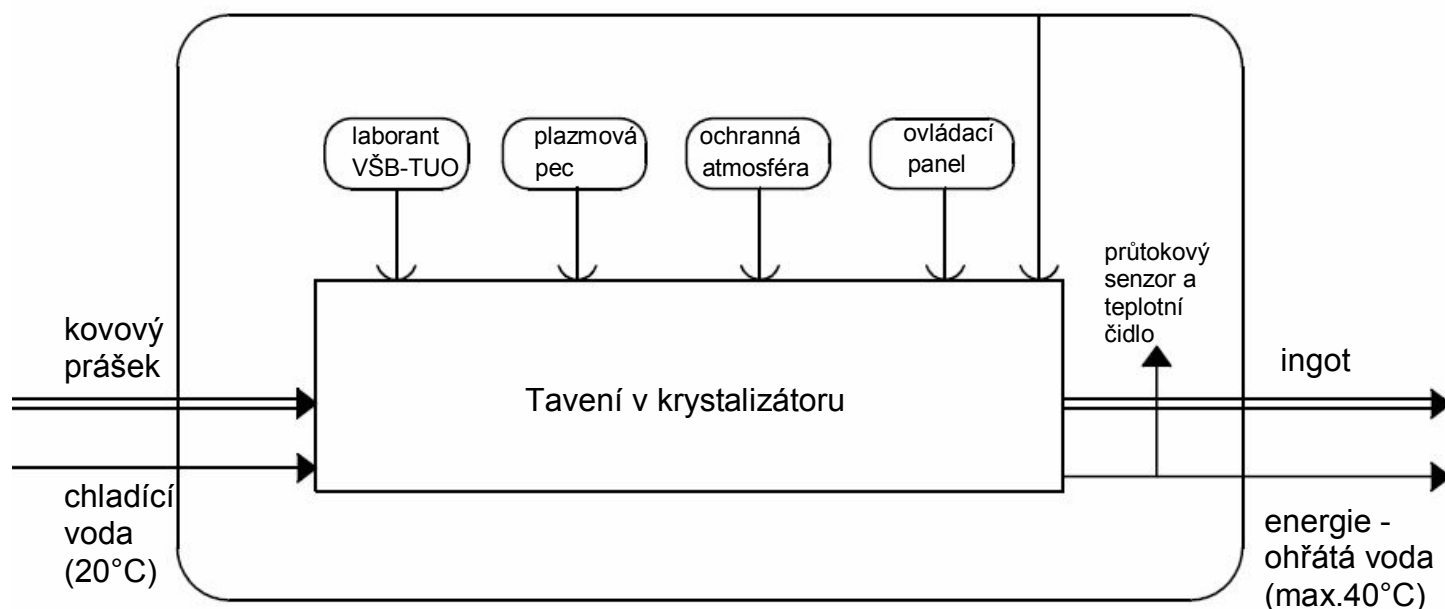
Výstup z transformačního procesu – tuhá forma zkoumaného materiálu je na příkladu Ti kontislítku zobrazena na obr.8. Tvarově nedefinovaný kontislítek není vhodnou formou pro jeho zpracování do podoby zkušební vzorku zejména u materiálů s výraznou afinitou k O_2 např. v obvyklých podmínkách aplikací klasických třískových obráběcích technologií.



obr.8 : Ingot ze stávajícího horizontálního krystalizátoru přetavený v laboratorní plazmové obloukové peci [1]

Model transformace na obr.9 znázorňuje popsání souvislosti. Tento model je základním kamenem celého transformačního procesu. Jeho konkretizací můžeme získat modely technického procesu a konstrukčního procesu

Laboratoře VŠB-TUO, r.2009



obr.9: Schéma transformačního procesu pro tavení v krystalizátoru

7 Požadavkový list

7.1 Zadané požadavky

- pro potřebu laboratoří FMML navrhuji krystalizátor laboratorní pece pro tavení a rafinaci neželezných kovů
- při zpracování návrhu krystalizátoru vycházím z jeho stávajícího provedení
- pozornost věnuji zejména zabezpečením rovnoměrného, definovaného chlazení jeho teplosměnné plochy

7.2 Moje vyspecifikované požadavky

- vstupní teplota vody 20°C – použití užitkové vody
- tlak chladicí vody v krystalizátoru je 1,1 MPa (až 2 MPa lze dosáhnout) – průtok se seřizuje na optimální hodnotu podle druhu taveného materiálu
- maximální výkon plazmového hořáku 60 KW – účinnost přenosu tepla na tavený materiál se pohybuje u plazmové pece s horizontálním krystalizátorem kolem 50%, čili 30 KW. Určitá část je odvedena chlazením plazmového hořáku a další část této energie je vyzařována do pecního prostoru, a tím je zatěžována stěna laboratorní pece
- pracovní prostředí – argon
- prostředí provozu – laboratoř
- požadavky na konstrukci – rozměry, jednoduchost
- požadavky na řízení – obsluha

8 Funkční požadavky

Jedná se o seznam funkcí, které musí laboratorní pec a její jednotlivé uzly (krystalizátor, plasmový hořák, chlazení atd.) zastávat. V mém případě se budu zabývat zejména horizontálním krystalizátorem.

8.1 Funkční vlastnosti :

- dosáhnout max. teploty krystalizátoru pomocí chlazení vodou 300°C – nedojde k difúznímu znečištění mědi do slitiny
- zabezpečit aby výstupní teplota vody byla max. 40°C – tím zamezíme zanášení krystalizátoru vodním kamenem a solí.

8.2 Konstrukční vlastnosti :

- zajistit aby start oblouku plazmového hořáku nepropálil krystalizátor - zvýšit průtok vody na začátku a konci krystalizátoru, tím dojde k zvýšení průtoku a tlaku v nebezpečném místě
- volba materiálu krystalizátoru: čistá měď – nejlepší poměr cena vs. součinitel tepelné vodivosti
- možnost zaměnitelnosti krystalizátoru
- zaručit stejný součinitel přestupu tepla v místě v místě kde probíhá tavba kovového prášku pomocí plazmového hořáku
- krystalizátor musí mít tvar korýtko – prostor pro násyp kovového prášku

8.3 Diagnostické funkce:

- sledování teploty tavicí pánve
- průtokový senzor chladící kapaliny krystalizátoru – měření rychlosti na vstupu, kontrola maxima 300°C
- analyzátor kyslíku -měření obsahu kyslíku v inertní atmosféře
- teplotní čidlo na výstupu kapaliny – kontrola maxima 40 °C
- tlakové čidlo pece – kontrola podtlaku pecního prostoru
- řídicí PC

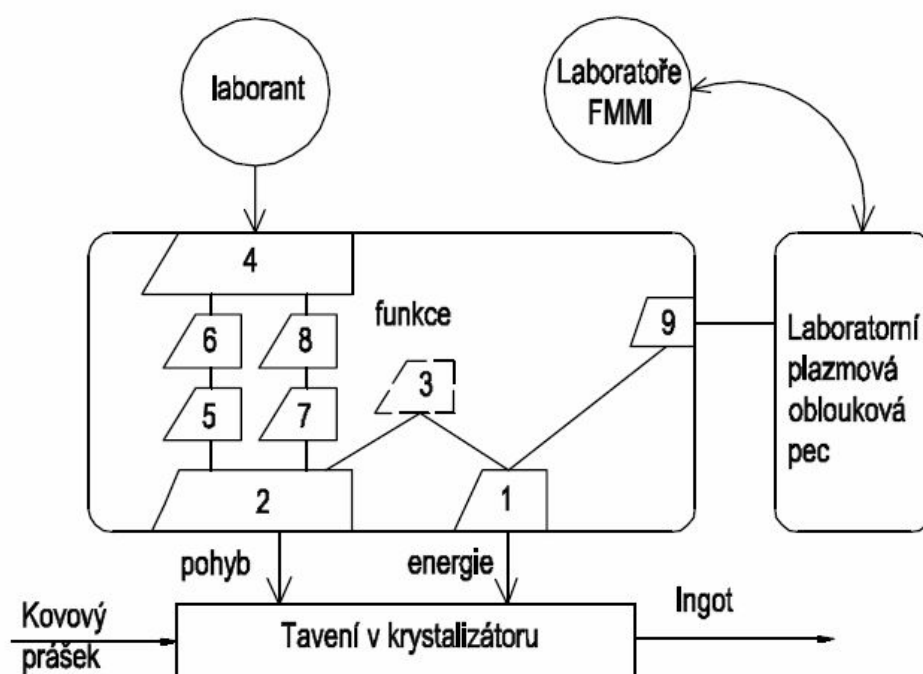
8.4 Řídicí funkce

- kontrola a řízení pecních procesů na základě diagnostických funkcí

9 Funkční a orgánová struktura

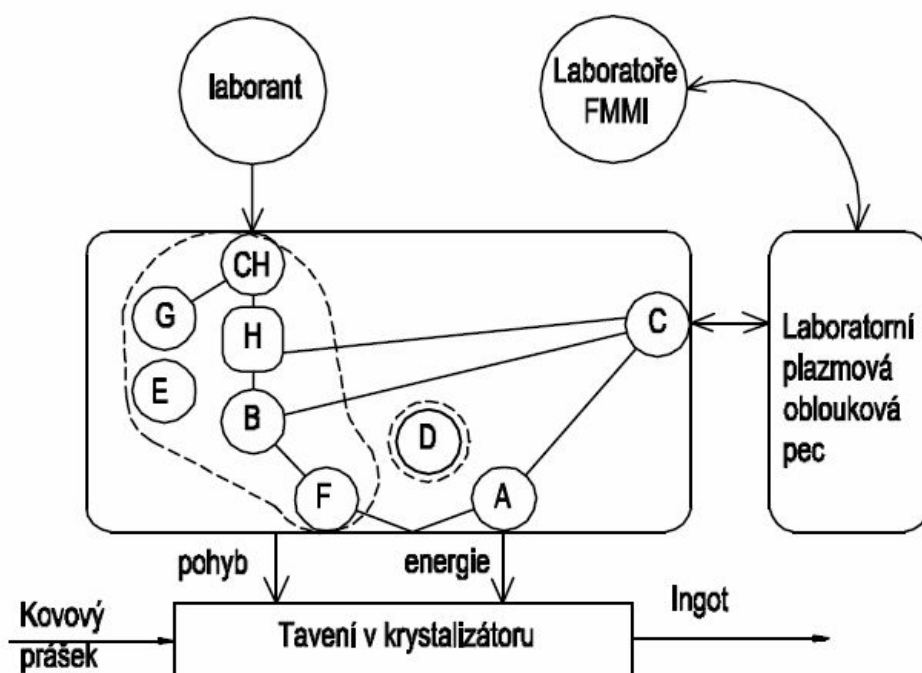
V této části je dle [4] proveden rozbor funkční struktury (obr.10) a orgánové struktury (obr.11). Popis jednotlivých částí je proveden v tab.1. Struktura je obecně množina prvků (elementů) a jejich vztahů, které tvoří určitý celek. Veškeré funkce uvedené ve funkční struktuře jsou vykonávány příslušnými orgány. Zde, s ohledem na provázanost jednotlivých funkcí systému, budu posuzovat laboratorní pec jako celek.

9.1 Funkční struktura



obr.10: Funkční struktura technického systému- tavení v krystalizátoru

9.2 Orgánová struktura



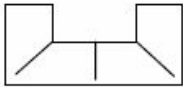
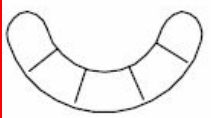

obr.11: Orgánová struktura technického systému- tavení v krystalizátoru

| | FUNKCE | ORGÁN | |
|---|---|---|----|
| 1 | Roztavit kovový prášek | Plazmový hořák | A |
| 2 | Umožnit tavení materiálu | krystalizátor | B |
| 3 | Uchladit na požadovanou teplotu | chladicí směs – voda | C |
| 4 | Kontrola definovaných požadavků | diagnostika – průtokový senzor – teplotní čidlo | D |
| 5 | Umožnit tavení materiálu s výraznou afinitou k O ₂ | ochranná atmosféra – argon | E |
| 6 | Umožnit pohyb krystalizátoru v plazmové peci | Aktuátor | F |
| 7 | Docílit stejného přestupu tepla v teplosměnných plochách | žebrovaná stěna krystalizátoru | G |
| 8 | Transport chladícího média do systému | čerpadlo | H |
| 9 | Vytvořit spojení součástí | spojovací členy, pájení | CH |

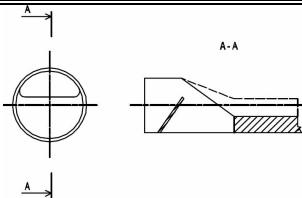
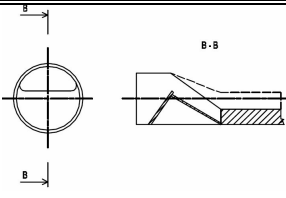
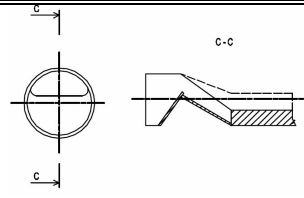
tab 1: Popis částí stavební a orgánové struktury

10 Morfologická matice

Morfologická matice má za cíl přehledně znázornit jednotlivé možnosti a způsoby řešení. Jednotlivá kritéria jsou obecně vektorem jeho vlastností. Vedle celkových hodnot lze stanovit a zjišťovat hodnoty dílčích. Kromě toho hodnocení spočívá na jednoduchých nebo komplexních, většinou ekonomických ukazatelích, např. na hospodárnosti, účinnosti atd. Zvolené orgány jsou pak zvýrazněny. V tab.2 je zpracován a vybrán nejvhodnější způsob pro tavení kovového prášku v horizontálním krystalizátoru. Je zde vybráno optimální řešení a to souvisí v optimální kombinaci těchto funkcí. V tab. 3 jsou znázorněna 3 řešení konstrukce horizontálního krystalizátoru, v nichž je pro funkci docílení stejného přestupu tepla na teplosměnných plochách použit stejný orgán tj. podélné žebrování a mění se pouze orgán pro docílení chlazení při startu oblouku.

| DÍLČÍ FUNKCE | | FUNKČNÍ PRINCIPY / ORGÁNY – NOSITELE FUNKCÍ | | | |
|-------------------------|---|---|--|---|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | <i>Pohyby krystalizátoru v peci UMOŽNIT</i> | šnekovým mechanismem | aktuátorem | pneumaticky | hydraulicky |
| 2 | <i>Chlazení UMOŽNIT</i> | vodou | solankou | vzduchem | |
| 3 | <i>Tavení materiálu s výraznou afinitou k O₂</i> | vakuum | CO ₂ | argon | corgon |
| 4 | <i>Tvar krystalizátoru</i> |  |  |  | |
| 5 | <i>Spojení UMOŽNIT</i> | svařování | pájení | lisování | |
| 6 | <i>Tavení materiálu UMOŽNIT</i> | plazmou | plynem | elektricky | fosilní paliva |
| 2.1 | <i>Řízení/ regulace</i> | regulace pomocí průtoku vody | regulace pomocí plazmy | ruční regulace | |

tab 2: Tavení v krystalizátoru – morfologická matice

| ORGÁNOVÉ STRUKTURY |  |  |  |
|---|---|--|---|
| <i>Splnění požadavků (stejně α)</i> | 2 | 1 | 1 |
| <i>Náročnost výroby</i> | 3 | 4 | 2 |
| <i>Technické nedostatky</i> | 3 | 1 | 2 |
| <i>Výrobní náklady</i> | 2 | 4 | 2 |
| <i>Celkové pořadí</i> | 2 | 2 | 1 |

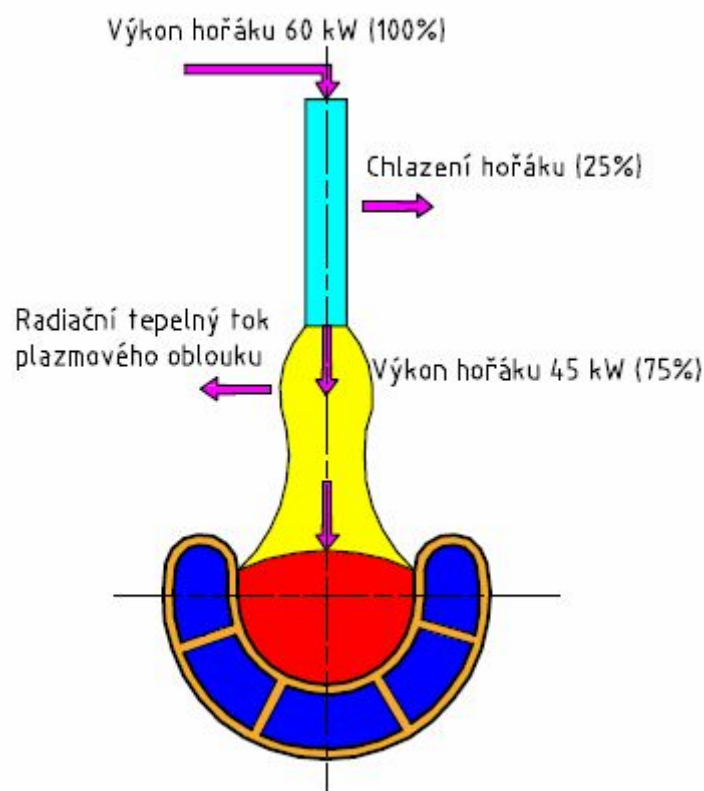
tab 3: Tavení v krystalizátoru – orgánová struktura(koncepční schéma)

Technické hodnocení jednotlivých variant je velmi podobné, ačkoliv u varianty C jsou lepší předpoklady na výrobu a výrobní náklady. Dále je zde nejjednodušší možnost výroby. Odhad výrobních nákladů pouze na základě porovnání součástí a snadnost výroby umožňuje vybrat tuto variantu jako nejvhodnější.

11 Teplotní návrh zatížení krystalizátoru

11.1 Tepelná bilance plazmové pece

Dle literatury [5] je tepelný tok plazmového hořáku (60kW) odveden více chladicími okruhy. Nejprve je odvedeno přibližně 25% příkonu hořáku chlazením plazmového hořáku. Do pecního prostoru je tudíž přivedeno 75% energie. Část se vyzařuje sáláním do pecního prostoru, tím se zatěžuje stěna laboratorní pece a zbývající část působí do taveniny. Budu uvažovat, že průtok vody v chladicím okruhu laboratorní pece a krystalizátoru je rovnoměrně rozdělen. Tudíž v horní části krystalizátoru bude stejné teplotní zatížení jako na stěnu laboratorní pece. Tento tepelný výkon budu považovat za kritický a nutný odvézt chlazením.



obr.12: Tepelná bilance plazmového hořáku

11.2 Výpočet zatížení krystalizátoru tepelným tokem

Dle literatury [6] pro celkový tepelný tok zářičem (plazmový oblouk) je určen Stefan-Boltzmannovým zákonem

$$Q_{12} = \varepsilon_n \cdot C_o \cdot \left[(T_1 + 273)^4 + (T_2 + 273)^4 \right] \cdot S_1 \quad [W] \quad (7.1)$$

kde: ε_n složená emisivita (plazmový zářič - stěna krystalizátoru) [1]

T_1 teplota plazmového oblouku [K]

T_2 teplota vnitřní stěny pece (volím 25°C) [K]

C_o součinitel vyzařování absolutně černého tělesa [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

S_1 plocha zářiče [m^2]

$$C_o = 5,67 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

Emisivita dvou těles, které na sebe vyzařují, je závislá na jejich vzájemné poloze. V mém případě jako uzavřený systém dvou ploch. Ta je popsána tzv. úhlovými součiniteli záření

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_z} - 1\right) + \varphi_p \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right) \cdot \varphi_p + 1} \quad [-] \quad (7.2)$$

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,8} - 1\right) + 0,00136 \cdot \left(\frac{1}{0,03} - 1\right) \cdot 1 + 1} = 0,773$$

kde: φ_z úhlový součinitel zářiče $[-]$
 φ_p úhlový součinitel záření stěny pece $[-]$
 ε_z emisivita zářiče $\varepsilon_z = 1$ $[-]$
 ε_p emisivita krystalizátoru lesklá měď : 0,03 $[-]$

$$\varphi_p = \frac{S_z}{S_p} \quad (7.3)$$

kde: S_p plocha stěny pece $[m^2]$

Dle [5] je vnitřní stěna plochy pece určena vztahem (7.4)

$$S_p = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_p}{4}\right)^2 + \pi \cdot D_p \cdot L_p \quad [m^2] \quad (7.4)$$

$$S_p = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,5}{4}\right)^2 + \pi \cdot 0,5 \cdot 0,5$$

$$S_p = 1,1781 m^2$$

Dle [5] se plocha zářiče určí dle vztahu (7.5), jedná-li se o plazmový oblouk nebo (7.6), jedná-li se o hladinu taveniny.

$$S_{z1} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_o}{4}\right)^2 + \pi \cdot D_o \cdot L_o \quad [m^2] \quad (7.5)$$

kde: D_o průměr oblouku $[m]$

L_o délka oblouku $[m]$

$$S_{z2} = a_H^2 \quad [m^2] \quad (7.6)$$

kde: a_H strana čtverce tavné lázně $[m]$

Dle [5] na základě zkušeností laboratoří FMMI v Ostravě se teplota plazmového oblouku pohybuje v rozmezí 3500 ÷ 3800°C. Při výpočtu budu vycházet z hodnoty $T_1 = 3600^\circ\text{C}$. Během výpočtu je nahrazen plazmový oblouk válcovým tělesem o průměru $D_o = 0,017\text{ m}$ a délce $L_o = 0,03\text{ m}$. Předpokládaná emisivita činí $\varepsilon_z = 0,8$

Určení plochy plazmového oblouku (7.5)

$$S_{z1} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,017}{4} \right)^2 + \pi \cdot 0,017 \cdot 0,03$$

$$S_{z1} = 0,0016\text{m}^2$$

Výpočet úhlového součinitele záření (7.3)

$$\varphi_p = \frac{0,0016}{1,1781}$$

$$\varphi_p = 0,00136$$

Tepelný tok vyzařovaný plazmovým obloukem (7.1)

$$Q_{12} = 0,773 \cdot 5,67 \cdot 10^{-5} \cdot \left[(3600 + 273)^4 + (25 + 273)^4 \right] \cdot 0,0016$$

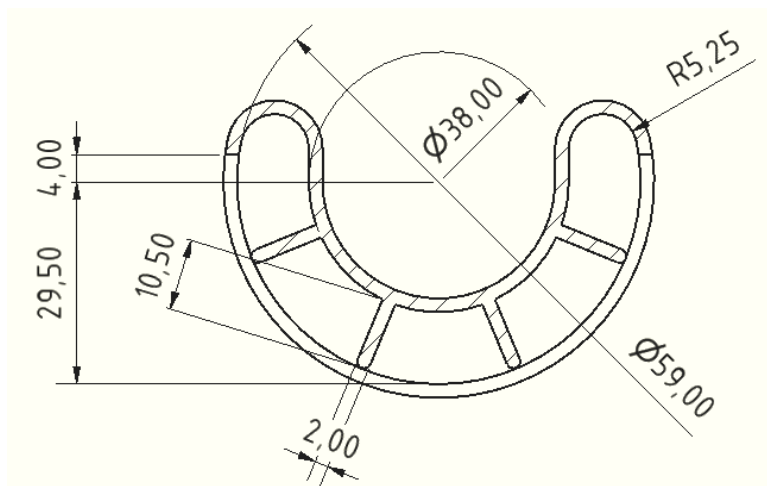
$$\underline{Q_{12} = 15779,3\text{W}}$$

S ohledem na bezpečnost volím tepelný tok, který působí na vrchní část krystalizátoru 17kW

12 Výpočet chlazení krystalizátoru

12.1 Výpočet hydraulického průměru krystalizátoru

V této části je nejprve proveden výpočet bez uměrnovacích členů a poté je proveden výpočet s uměrnovacími členy. Při návrhu žebor v krystalizátoru je zapotřebí, aby byly napájeny rovnoměrně po celé šíři. Žebra musí být napájeny k měděné trubce v horní části, aby nevznikla mezi žebrem a pláštěm krystalizátoru mezera.



obr.13 : čelní pohled na horizontální krystalizátor

Výpočet obsahu chladicího kanálu krystalizátoru bez usměrňovacích členů:

$$S_K = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \frac{\pi \cdot c^2}{4} + 2 \cdot a \cdot b \quad [m^2] \quad (8.1)$$

$$S_K = \frac{\pi \cdot 0,059^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} + \frac{\pi \cdot 0,00525^2}{4} + 2 \cdot 0,004 \cdot 0,0105$$

$$S_K = 0,0009 \text{ m}^2$$

Výpočet obvodu chladicího kanálu krystalizátoru bez usměrňovacích členů:

$$o_K = \frac{\pi \cdot D + \pi \cdot d}{2} + \pi \cdot c + 4 \cdot a \quad [m] \quad (8.2)$$

$$o_K = \frac{\pi \cdot 0,059 + \pi \cdot 0,038}{2} + \pi \cdot 0,00525 + 4 \cdot 0,004$$

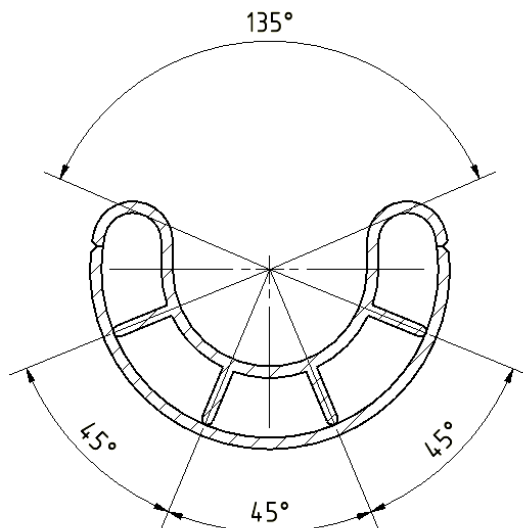
$$o_K = 0,185 \text{ m}$$

Hydraulický průměr chladicího kanálu krystalizátoru bez usměrňovacích členů:

$$D_{hK} = \frac{4 \cdot S_K}{o_K} \quad [m] \quad (8.3)$$

$$D_{hK} = \frac{4 \cdot 0,0009}{0,185}$$

$$D_{hK} = 0,019 \text{ m}$$



obr.14 : Úhlové rozmístění žeber po obvodu

Výpočet celkového obsahu chladících kanálů krystalizátoru:

$$S_K = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \frac{\pi \cdot c^2}{4} + 2 \cdot a \cdot b - 4 \cdot d \cdot e \quad [m^2] \quad (8.4)$$

$$S_K = \frac{\pi \cdot 0,059^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} + \frac{\pi \cdot 0,00525^2}{4} + 2 \cdot 0,004 \cdot 0,0105 - 4 \cdot 0,002 \cdot 0,0105$$

$$S_K = 0,00082 \text{ m}^2$$

Výpočet celkového obvodu chladícího kanálu krystalizátoru:

$$o_K = \frac{\pi \cdot D + \pi \cdot d}{2} + \pi \cdot c + 4 \cdot a + 8 \cdot e \quad [m] \quad (8.5)$$

$$o_K = \frac{\pi \cdot 0,059 + \pi \cdot 0,038}{2} + \pi \cdot 0,00525 + 4 \cdot 0,004 + 8 \cdot 0,0105$$

$$o_K = 0,269 \text{ m}$$

Hydraulický průměr chladícího kanálu krystalizátoru s usměrňovacími členy:

$$D_{hK} = \frac{4 \cdot S_K}{o_K} \quad [m] \quad (8.6)$$

$$D_{hK} = \frac{4 \cdot 0,00082}{0,269}$$

$$D_{hK} = 0,012 \text{ m}$$

Jak je z výpočtu patrné po napájení žeber do krystalizátoru se zvětšila teplosměnná plocha, a tím se zvyšujeme účinnost chlazení kapalinou.

12.2 Součinitel přestupu tepla

Reynoldsovo číslo

volím rychlost chladicí vody $w = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\text{Re} = \frac{w \cdot D_{hK} \cdot \rho_V}{\eta} \quad (8.7)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot 0,012 \cdot 998,205}{0,001004} = 48597,86$$

kde: ρ_V hustota vody $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
 η dynamická viskozita $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 D_{hK} hydraulický průměr $[\text{m}]$

Při $\text{Re} < 50000$ jsou platné zákonitosti laminární mezní vrstvy, takže pro výpočet Nu a tím i součinitele α je možno použít kritériální rovnice. Použito z literatury [6]

Obecně – pro nucenou konvekci – platí kritériální rovnice ve tvaru $Nu = C \cdot R_E^m \cdot Pr^n$, kde R_E je Reynoldsovo číslo a Pr je Prandtlovo kritérium. C , m , n jsou konstanty závislé na druhu a uspořádání proudění.

Splnění výše uvedených požadavků a podmínek zejména fyzikálních a technologických je podmíněno konstrukčním návrhem chladicího systému krystalizátoru. Pro turbulentní proudění s $\text{Re} > 10^4$ lze pro stanovení sdílení tepla v kanále použít obecný výraz (8.8)

$$Nu = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25} \quad (8.8)$$

kde: Nu Nuseltovo kritérium
 Re Reynoldsovo kritérium
 Pr Prandtlovo kritérium stanovené pro teplotu kapaliny
 Pr_s Prandtlovo kritérium stanovené pro teplotu stěny

Dle literatury [7] lze ze vztahu (8.8) lze po úpravě obdržet následující vztah (8.9) pro stanovení součinitele přestupu tepla v závislosti na hustotě, rychlosti proudící vody a hydraulickém průměru chladicího kanálu

Stanovení součinitele α

$$\alpha_K = C \cdot \frac{(\rho \cdot w)^{0,8}}{D_{hK}^{0,2}} \quad \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (8.9)$$

$$\alpha_K = 7,5 \cdot \frac{(998,205 \cdot 4)^{0,8}}{0,012^{0,2}} = \underline{13761,65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

kde: α_K součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 Csoučinitel závislý na teplotě vody [1]
 ρ hustota vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 wrychlost proudění vody [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 D_{hK} hydraulický průměr kanálu [m].

Stanovení součinitele C je možno provést vztahem:

$$C = \frac{t_2}{t_1} \quad [-] \quad (8.10)$$

$$C = \frac{300}{40} = \underline{7,5}$$

kde: t_1 maximální teplota vody při které nedojde k zanášení krystalizátoru vodním kamenem a solí [$^{\circ}\text{C}$]
 t_2 maximální teplota krystalizátoru při které nedojde k difúznímu znečištění mědi do slitiny [$^{\circ}\text{C}$]

Prandtlovo kritérium

$$P_R = \frac{\nu_{40}}{a} \quad (8.11)$$

$$P_R = \frac{0,658 \cdot 10^{-6}}{1,53 \cdot 10^{-7}} = \underline{4,3}$$

$$a = \frac{\lambda_{40}}{c_{p40} \cdot \rho_{40}} \quad \left[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (8.12)$$

$$a = \frac{0,635}{4174 \cdot 992,22} \cdot \underline{1,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}$$

kde: ν_{40} kinematická viskozita vody při 40°C [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 λ_{40} součinitel prostupu tepla vody při 40°C [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ_{40} hustota vody při 40°C [$kg \cdot m^{-3}$]

12.3 Základní bilanční rovnice

Pro správnost konečných výpočtů a funkčnost chladicího zařízení musí platit bilanční rovnice dle literatury [7]

$$P = \dot{m} \cdot c_{pV} \cdot \Delta t_V = \alpha \cdot S_K \cdot \Delta \bar{t} \quad (8.13)$$

kde: P..... tepelný výkon [W]
 \dot{m} hmotnostní tok vody [$kg \cdot s^{-1}$]
 c_{pV} měrná tepelná kapacita vody za stejného tlaku [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 Δt_V rozdíl teplot na vstupu a výstupu [$^{\circ}C$]
 α_K součinitel přestupu tepla [-]
 S_K teplosměnná plocha chladicího kanálu [m^2]
 $\Delta \bar{t}$ střední logaritmický rozdíl teplot [$^{\circ}C$]

Hmotnostní tok vody

$$\dot{m} = w \cdot S_K \cdot \rho_V \quad (8.14)$$

kde: ρ_V hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]
 w rychlost proudění vody [$m \cdot s^{-1}$]
 S_K průřez chladicího kanálu [m^2]

Výpočet teplotního rozdílu vody na vstupu a výstupu

Vycházíme z části bilanční rovnice (8.13) $P = \dot{m} \cdot c_{pV} \cdot \Delta t_V$ do které dosadíme vztah pro hmotnostní tok vody (8.14). Z těchto dvou rovnic dostaneme vztah (8.15)

$$P = w \cdot S \cdot \rho_V \cdot c_{PV} \cdot \Delta t_V \quad (8.15)$$

⇓

$$\Delta t_V = \frac{P}{w \cdot \frac{\pi \cdot D_{hK}^2}{4} \cdot \rho_V \cdot c_{PV}}$$

$$\Delta t_V = \frac{17000}{4 \cdot \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} \cdot 998,205 \cdot 4183} = 8,99^\circ C$$

Teplota výstupní chladící vody

$$t_{VY} = \Delta t_V + t_{VS} \quad (8.16)$$

$$t_{VY} = 8,99 + 20$$

$$t_{VY} = 28,99^\circ C$$

kde: t_{VS} teplota vstupní chladící vody [$^\circ C$]

t_{VY} teplota výstupní chladící vody [$^\circ C$]

12.4 Kontrola chlazení

Zde vycházíme z bilanční rovnice (8.13). Hodnoty obou stran bilanční rovnice mají být přibližně stejné. Tuto rovnici dle literatury [7] rozepíšeme na rovnici (8.17)

$$\frac{\pi \cdot D_{hK}^2}{2} \cdot w \cdot \rho_V \cdot [c_{PV} \cdot (t_1 - t_2)] = \alpha_K \cdot S_K \cdot L_K \cdot \left(t_{ST} - \frac{t_2 - t_1}{2} \right) \quad (8.17)$$

$$\frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} \cdot 4 \cdot 998,205 \cdot [4193 \cdot (28,99 - 20)] = 13761,65 \cdot 0,0082 \cdot 0,532 \cdot \left(300 - \frac{28,99 - 20}{2} \right)$$

$$\frac{17222 \div 17540}{}$$

kde: ρ_V hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]

w rychlost proudění vody [$m \cdot s^{-1}$]

S_K průřez chladicího kanálu [m^2]

L_K délka chladicího kanálu [m] $L_K = 0,532$... hodnota odvozena

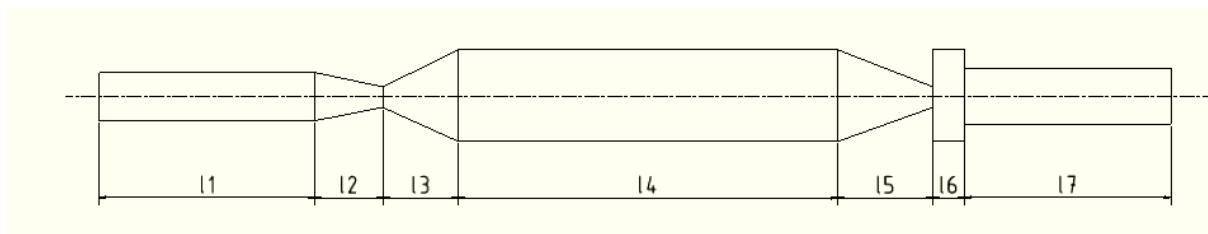
z výkresové dokumentace

t_{ST} teplota povrchu stěny chladicího kanálu [$^\circ C$]

Při rychlosti $w = 4 m \cdot s^{-1}$ je dosaženo optimálního chlazení krystalizátoru

13 Učení tlakových ztrát v krystalizátoru

Na chladicí systém jsou kladeny požadavky, které je třeba dodržovat. Jedním z parametrů je i tlak chladicí vody. Proto je třeba určit tlakové ztráty vznikající při průtoku vody chladicím systémem. Celý systém chlazení krystalizátoru je rozdělen do sedmi úseků:



obr.15 : Zjednodušený náčrt krystalizátoru s přívodním potrubím

Tabulka rozměrů:

| | |
|----|--------|
| L1 | 805 mm |
| L2 | 25 mm |
| L3 | 79 mm |
| L4 | 351 mm |
| L5 | 51 mm |
| L6 | 32 mm |
| L7 | 810 mm |

13.1 Třecí ztráty

Při výpočtu třecích ztrát se vychází dle literatury [6] z Weisbachova výrazu

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{l}{D_{hk}} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \quad [Pa] \quad (9.1)$$

Součinitel tření λ je především závislý na kinematické viskozitě vody ν , průměrné rychlosti proudění w , hydraulickém průměru kanálu D_{hk} a poměrné drsnosti kanálu

Kinematická viskozita vody je při 20°C :

$$\nu_{20} = 1,004 \cdot 10^{-6} \left[m^2 s^{-1} \right]$$

U turbulentního proudění je pro hladké potrubí koeficient:

$$A = 0,316 \text{ a } n = 0,25$$

Hustota vody při 20°C:

$$\rho_v = 998,205 \left[kg \cdot m^{-3} \right]$$

Reynoldsovo číslo

$$R_E = \frac{w \cdot D_h}{\nu_{20}} \quad [-] \quad (9.2)$$

Součinitel tření

$$\lambda = \frac{A}{R_E^n} \quad [-] \quad (9.3)$$

Z důvodu známé rychlosti v krystalizátoru začnu počítat třecí ztráty v úseku L4 . Dosazením do rovnic (9.2) a (9.3) zjistíme součinitel tření λ . Dosazením do vzorce (9.1) pak zjistíme třecí ztrátu pro zkoumaný úsek.

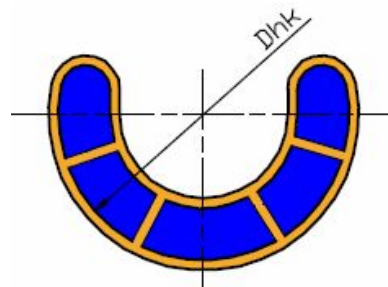
I. ztráta třením:

$$R_E = \frac{4 \cdot 0,012}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 47808$$

$$\lambda_1 = \frac{0,316}{R_E^{0,25}} = 0,02$$

$$\Delta p_{tr1} = \lambda_1 \cdot \frac{L_4}{D_{hK}} \cdot \frac{w_4^2 \cdot \rho_V}{2}$$

$$\Delta p_{tr1} = 0,02 \cdot \frac{0,351}{0,012} \cdot \frac{4^2 \cdot 998,205}{2} = 4700 Pa$$

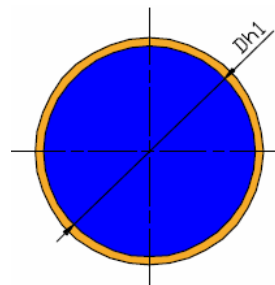


obr.16.1 : Profil na délce L₄

II. ztráta třením:

$$R_E = \frac{4 \cdot 0,03}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 119522$$

$$\lambda_2 = \frac{0,316}{R_E^{0,25}} = 0,017$$



obr.16.2 : Profil na délce L₁, L₂, L₃, L₅, L₇

$$w_2 = \frac{w_4 \cdot S_K}{S_1} = \frac{w_4 \cdot S_K}{\frac{\pi \cdot d_{h1}^2}{4}}$$

$$w_2 = \frac{4 \cdot 0,00082}{0,0007} = 4,68 m \cdot s^{-1}$$

$$\Delta p_{tř2} = \lambda_2 \cdot \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_5 + L_7}{D_{h1}} \cdot \frac{w_2^2 \cdot \rho_V}{2}$$

$$\Delta p_{tř2} = 0,017 \cdot \frac{0,805 + 0,025 + 0,079 + 0,051 + 0,87}{0,03} \cdot \frac{4,68^2 \cdot 998,205}{2} = 11336 Pa$$

III. ztráta třením:

$$R_E = \frac{4 \cdot 0,059}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 226923$$

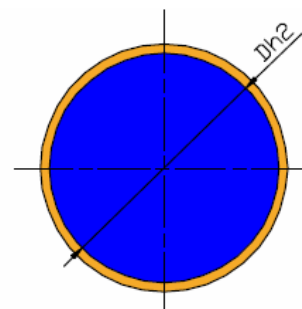
$$\lambda_3 = \frac{0,316}{R_E^{0,25}} = 0,014$$

$$w_1 = \frac{w_4 \cdot S_K}{S_1} = \frac{w_4 \cdot S_K}{\frac{\pi \cdot d_{h2}^2}{4}}$$

$$w_3 = \frac{4 \cdot 0,00082}{0,0027} = 1,21 m \cdot s^{-1}$$

$$\Delta p_{tř3} = \lambda_3 \cdot \frac{L_6}{D_{h2}} \cdot \frac{w_3^2 \cdot \rho_V}{2}$$

$$\Delta p_{tř3} = 0,014 \cdot \frac{0,032}{0,059} \cdot \frac{1,21^2 \cdot 998,205}{2} = 5,55 Pa$$



obr.16.3 : Profil na délce L_5

13.2 Místní ztráty

Místní ztráty jsou způsobeny změnou velikosti průřezu nebo změnou směru, což má za následek vznik vírů v tekutině. Vznik a průběh vírů se realizuje na úkor kinetické energie proudící tekutiny. Vlivem vazkosti tekutiny se víry v tekutině postupně utlumí a jejich energie se změní v teplo. Místní ztráty se vyjadřují (obdobně jako ztráty třením) buď ztrátovou výškou

$$h_{t,m} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad (m) \quad (9.4)$$

nebo tlakovou ztrátou

$$p_{z,m} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (Pa) \quad (9.5)$$

kde ζ je součinitel místní ztráty

Součinitel místní ztráty ζ závisí zejména na geometrii místní ztráty a na rychlosti proudící tekutiny. Zpravidla se určuje experimentálně a má platnost jen ve stejných podmínkách, za kterých byl určen, nebo ve fyzikálně podobných případech.

Zmenšení hydraulického průměru $\zeta = 0,33$ [–]

Zvětšení hydraulického průměru $\zeta = 0,56$ [–]

Rozšíření hydraulického průměru $\zeta = 0,3$ [–]

Tento výpočet byl proveden v modulu firmy TZB-info [8].

Snížení hydraulického průměru

| | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------|
| $\Delta p_{ZM} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$ | součinitel místního odporu (zeta) | $\zeta =$ | <input type="text" value="0,33"/> | [-] |
| | rychlost proudění | $w =$ | <input type="text" value="4"/> | [m/s] |
| | hustota proudící kapaliny (ró) | $\rho =$ | <input type="text" value="998,205"/> | [kg/m ³] |
| | tlaková ztráta místními odpory | $\Delta p_{ZM} =$ | 2635 | [Pa] |

Zvětšení hydraulického průměru

| | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------|
| $\Delta p_{ZM} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$ | součinitel místního odporu (zeta) | $\zeta =$ | <input type="text" value="0,56"/> | [-] |
| | rychlost proudění | $w =$ | <input type="text" value="4,68"/> | [m/s] |
| | hustota proudící kapaliny (ró) | $\rho =$ | <input type="text" value="998,205"/> | [kg/m ³] |
| | tlaková ztráta místními odpory | $\Delta p_{ZM} =$ | 6122 | [Pa] |

Rozšíření hydraulického průměru

| | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------|
| $\Delta p_{ZM} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$ | součinitel místního odporu (zeta) | $\zeta =$ | <input type="text" value="0,3"/> | [-] |
| | rychlost proudění | $w =$ | <input type="text" value="1,21"/> | [m/s] |
| | hustota proudící kapaliny (ró) | $\rho =$ | <input type="text" value="998,205"/> | [kg/m ³] |
| | tlaková ztráta místními odpory | $\Delta p_{ZM} =$ | 219 | [Pa] |

Celkové tlakové ztráty v potrubí

Tyto ztráty určíme sečtením místních a tlakových ztrát

$$\begin{aligned}\Delta p_Z &= \Delta p_{ir1} + \Delta p_{ir2} + \Delta p_{ir3} + 2 \cdot \Delta p_{ZM1} + \Delta p_{ZM2} + \Delta p_{ZM3} \\ \Delta p_Z &= 4700 + 11336 + 5,55 + 2 \cdot 2635 + 6121 + 219 \\ \Delta p_Z &= 27651,5 Pa\end{aligned}$$

14 Určení tloušťky stěny krystalizátoru dle [1]

Pro krystalizátor volím materiál EN CW004A - Cu-ETP, ČSN 423001-Cu99,9E. Rozměr 63x2 uveden z tabulky v příloze (IV). Jedná se o měď o čistotě 99,85 %. Volím tento materiál z důvodu vysoké čistoty velmi dobré svařitelnosti. Hodnota meze pevnosti je $R_m = 290 \text{ MPa}$

- součinitel hodnoty svaru $\phi_P = 1$. Přídavek na korozi a výr. tolerance $c_V = 1,2 \text{ mm}$, vnitřní přetlak (pracovní tlak) $0,6 \text{ MPa}$, zkušební přetlak vodou $1,2 \text{ MPa}$, vnitřní průměr $D = 59 \text{ mm}$
- pevnostní výpočet tlakové nádoby podle ČSN 690010
- podle části 4.5. čl.3.1 je výpočtová tloušťka stěny pláště bez přídavků
- bezpečnost n_{BN} pro měď a její slitiny činí 3,5

Výpočet meze pevnosti pro zatížení větším než 100°C :

$$\begin{aligned}R_M &= R_M \min. \cdot (1 - 0,00238 \cdot (t - 100^\circ\text{C})) \\ R_M &= 290 \cdot (1 - 0,00238 \cdot (300 - 100)) = 151,96 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (10.1)$$

$$\sigma_D = \frac{R_M}{n_{BN}} = \frac{151,96}{3,5} = 43,4 \text{ MPa}\quad (10.2)$$

Určení tloušťky stěny krystalizátoru:

$$\begin{aligned}s_R &= \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_D - p} = \frac{0,6 \cdot 59}{2 \cdot 43,4 - 0,6} \\ s_R &= 0,43 \text{ mm}\end{aligned}\quad (10.3)$$

Provedená tloušťka stěny pláště (minimální)

$$s \geq s_R + c_V = 0,43 + 1,2 = 1,63 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka stěny pláště je $s = 2 \text{ mm}$ **vyhovuje**

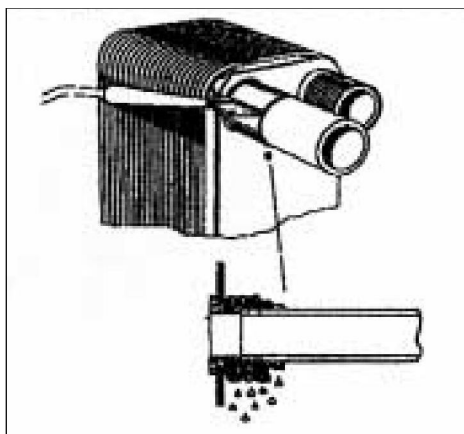
Kontrola pro zkušební přetlak se nemusí provádět pokud platí

$$p_z \leq p \cdot 1,35 \cdot \frac{\sigma_{DMAX}}{\sigma_D} \quad (10.4)$$

$$0,5 \leq 0,6 \cdot 1,35 \cdot \frac{43,9}{43,4} = 0,82 MPa \quad \dots\dots\dots \text{vyhovuje}$$

15 Pájení mědi

Svařování mědi je podobné svařování oceli, ale je obtížnější. Je tomu tak proto, že měď vede teplo lépe než ocel a také proto, že měď má bod tavení a ne rozmezí tavení, jako má ocel. Abychom dosáhli a udrželi pracovní teplotu na svařovaném místě, je nutný vyšší přívod tepla než u oceli. Při příliš malém přívodu tepla se potřebná pracovní teplota nedosáhne; při příliš velkém přívodu tepla se svařované místo celé roztaví. Proto jsem se rozhodl použít tvrdé pájení při spojování krystalizátoru. Pro tvrdé pájení jsem se rozhodl, protože u měkkého pájení je dovolená teplota jen do 110 °C.



obr. 17. Příklad pájeného spojení [10]

Tvrdé pájení trubek z mědi a slitin mědi

Tyto informace jsem získal z katalogu [9] firmy Böhler Thyssen Special Welding, jejíž katalog je uveden v příloze (III). Jako ohřev je použit kyslíkoacetylenový hořák s neutrálním plamenem nebo malým přebytkem acetylenu

Ukázka popisu tvrdých pájek dle [9]

A 2004 (norma: L-CuP 6) – Tvrdá pájka s obsahem fosforu. Výborně tekoucí pájka pro kapilární pájení mědi a slitin mědi, vhodná a schválená pro plynové a vodovodní instalace. Pracovní teplota 730°C

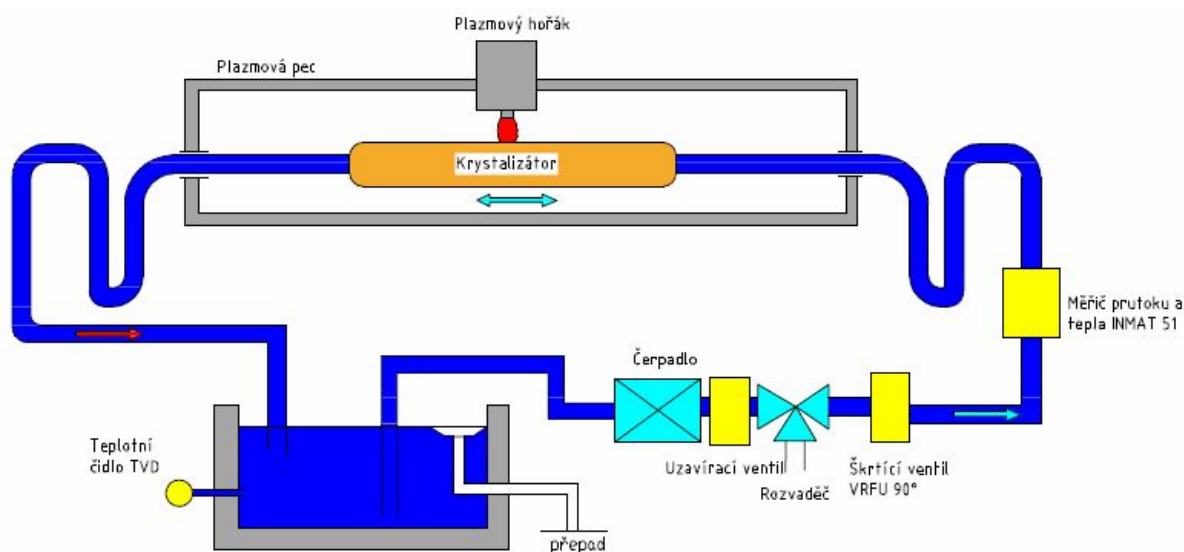
A / AF 319 (norma: L-Ag 34 Sn) – Tvrdá pájka bez kadmia s vysokým obsahem stříbra. Kapilární pájení ocelí, mědi a slitin mědi, niklu a slitin niklu Schválená pro plynové a vodovodní instalace. Pracovní teplota 710°C

A / AF 311 (norma: L-Ag44) - Tvrdá pájka bez kadmia s vysokým obsahem stříbra. Kapilární

Z uvedeného výběru pájek je jasné patrné že tvrdé pájení bude pro horizontální krystalizátor vyhovovat. Pracovní teploty se pohybují v rozmezí 650-750°C, což za předpokladu, že maximální teplota stěny krystalizátoru je stanovena na 300°C bude plně dostačovat.

16 Diagnostika účinků chlazení krystalizátoru

Nejvyšší teplota kterou má mít kontrolovaný horizontální krystalizátor je 300°C, proto je nutné tuto teplotu sledovat. K tomuto sledování se užívají tzv. diagnostická zařízení.



obr. 18: Zjednodušené schéma chladicího okruhu krystalizátoru

16.1 Snímač průtoku

Průtok vody se měří škrťacími orgány nebo rychlostními sondami s jedním nebo dvěma snímači tlakové difference s výstupním proudovým unifikovaným signálem nebo objemovým průtokoměrem, popř. hmotnostním průtokoměrem s lineárním frekvenčním výstupním signálem nebo proudovým signálem. Lze použít i vodoměr s impulsním výstupem

Jako přístroj je zvolen INMAT 51 [12]. Tento přístroj je vytvořen pro měření průtoku vody. Dále pak měření tepla předaného vodou, vodní párou přímou, nepřímou a náhradní metodou a měření a zpracování dalších veličin jako jsou proud, odpor, frekvence, teplota, otáčky, hladina a další.

Výhody:

- snadná modifikace aplikace dle potřeb zákazníka
- lze použít jako samostatné měřidlo i k budování rozsáhlých měřicích systémů
- kompaktní konstrukce
- archivace dat až 2 Mb
- dálková komunikace prostřednictvím radiomodemu
- schváleno k měření průtoku plynů plynoměrem, clonou i dalšími průtokoměry
- ověření i změna parametrů bez odpojování kabeláže
- rozsáhlá autodiagnostika. Teplota vody se měří odporovým snímačem ve čtyřvodičovém zapojení. INMAT 51 je použitelný pro teplotu vody od 0 do 200 °C. Pro zjištění průtoku vody v potrubí

16.2 Teplotní čidlo

Toto čidlo je umístěno v nádrži a pomocí něj kontrolujeme teplotu vody. Diagnostikuje nám zda není třeba vodu zchladi na požadovaných 20°C. Po připojení k přístroji INMAT 51 se pak může diagnostikovat celkové teplo předané vodou pomocí teplot na vstupu a výstupu

Jako čidlo je zvolen produkt SA1XL-K-SRTC firmy OMEGA .SA1XL se může použít jako samolepící termočlánek pro teploty do 260°C.



obr. 19: Teplotní nalepovací sonda SA1XL-K-SRTC

17 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala inovací horizontálního krystalizátoru plazmové pece pro potřebu laboratoří FMML. Tento typ horizontálního krystalizátoru nachází uplatnění u laboratorních zařízení pro zhotovování zkušebních vzorků. Cílem bylo zabezpečit rovnoměrného a definovaného chlazení jeho teplosměnné plochy. V současnosti je horizontální krystalizátor používán bez jakýchkoliv usměrňovacích členů, což má za následek nerovnoměrné chlazení a tudíž možnost vzniku parních bublin a rázů. V úvodu projektu je zpracován požadavkový a funkční list, který je pak rozveden do struktur. Ze tří zvolených konstrukčních variant řešení je vybrána nejvhodnější a ta je dále zpracována ve výkresové dokumentaci.

Při návrhu horizontálního krystalizátoru bylo třeba dbát, aby nedocházelo k difúznímu znečištění mědi do slitiny. Tento problém řeší maximální přípustná teplota krystalizátoru 300°C . Teplota přehřátého titanu (niklu) má totiž ve styku s mědí okolo 1750 (1500) $^{\circ}\text{C}$. Z toho důvodu bylo nutné krystalizátor dostatečně a rovnoměrně chladit. Proto jsem navrhl žebrování, které tento problém řeší.

Problém spočíval vtom nalézt vhodný způsob výroby takto upraveného krystalizátoru. Svařování mědi je podobné svařování oceli, ale je obtížnější. Je tomu tak proto, že měď vede teplo lépe než ocel a také proto, že měď má bod tavení a ne rozmezí tavení, jako má ocel. Abychom dosáhli a udrželi pracovní teplotu na svařovaném místě, je nutný vyšší přívod tepla než u oceli. Při příliš malém přívodu tepla se potřebná pracovní teplota nedosáhne a při příliš velkém přívodu tepla se svařované místo celé roztaví. Z toho důvodu jsem se rozhodl pro tvrdé pájení. Dalším problémem bylo zabezpečit start oblouku, který probíhá na začátku tavby v krystalizátoru. Jedná se o nárazové zvýšení teploty, které je třeba uchladiť, aby nedošlo k protavení. Toho jsem docílil v místě startu plazmového hořáku zmenšením průměru clonkou a navedením vody v přívodním potrubí pomocí nástavce do kritických míst. V kritickém místě tudíž vzroste tlak a rychlost proudění vody.

U chladicí vody se vyskytl problém vtom, že při teplotě vyšší jak 40°C dochází k zanášení krystalizátoru vodním kamenem. Ten pak působí jako izolace a může dojít k přetavení. Z výpočtové zprávy se ukázalo že při rychlosti $w = 4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ je dosaženo optimálního chlazení krystalizátoru.

Kritické teploty stěny krystalizátoru a chladicího média je potřeba diagnostikovat a to zvoleným snímačem průtoku a teplotním čidlem.

Seznam použité literatury

- [1] NOGA, Z. *Laboratorní plazmové zařízení pro polokontinuální tavení a zpracování materiálů* [online]. 2005, [cit. 2008-09-08]. Dostupné z URL : <http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2005/number3/mag02/mag02.pdf>.
- [2] ŠÍPKOVSKÝ, D. *Laboratorní plazmová pec pro výrobu kontislitků obdélníkového průřezu z Ti-Ni slitin*. Ostrava: Vysoká škola báňská. Katedra výrobních strojů a konstruování, 2004. 113 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Noga, Csc.
- [3] Johnson T.P., Jesper N.E., Zouny J.M., Ward R.M., Jacobs M.H.. *The microstructure of plasma arc cold-hearth melte Ti-48Al-2Mn-2Nb* Journal de physique, The University of Birmingham, Elms Road, Edgabaston, United Kingdom 1993. 6 s.
- [4] ŠTĚTINA, Josef. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy. Citace: Plynulé odlévání oceli-základní principy*. [online]. 2007, aktualizované 25.3. 2007 [cit. 2009-04-21].
Dostupný z URL: <<http://otp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/kapitola-1.htm>>
- [4] HUBKA, Vladimír. *Konstrukční nauka-obecný model postupu při konstruování*. 2. přepracované a doplněné vydání přeložil a k vydání připravil Stanislav Hosnedl. 2.vyd. Zurich:Heurista, 1995. 118 s. ISBN 80-90 1135-0-8
- [5] ŠÍMÍK, L. *Studená pánev*. Ostrava: Vysoká škola báňská. Katedra výrobních strojů a konstruování, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Noga, Csc.
- [6] VOMOČIL, Z – HAJKR, Z. – JUREČKA, P. *Cvičení do sdílení tepla a proudění*. 1. vyd. Ostrava: 2000. Kapitola 6, s. 47-74
- [7] NOGA, Z., JABLONSKÝ, D. *Optimalizace délky krystalizátoru pro výrobu kontislitků z Ti slitin* [online]. 2005, [cit. 2008-09-08].
- [8] TZB-info. *Tlaková ztráta místními odpory*. [online]. 2008, aktualizované 25.2. 2009 [cit. 2009-05-02].
Dostupný z URL: <<http://vytapieni.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=46&h=38&obor=5>>
- [9] *Böhler Thyssen Special Welding*. Praha: Böhler Uddeholm CZ s.r.o., U silnice 949, 12 str. [online], [cit. 2009-03-28].
Dostupný z URL: < www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/BTS_prospekty.pdf >
- [10] *Longtherm deskové výměníky tepla*. Praha : Reflex CZ, s.r.o., 8 str. [online],

[cit. 2009-04-16]. Dostupný z URL:

<www.reflexcz.cz/?download=mp/mpi_longtherm.pdf>

[11] *Pevnostní výpočet tlakové nádoby podle ČSN 690010* [on-line],

aktualizované 30.8.2005 [cit.2009-02-11].Dostupný z URL:

<<http://www.fs.cvut.cz/cz/U218/peoples/hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Vypocet%20tlakove%20nadoby%20podle%20CSN%20690010.pdf>>

[12] JSP Měření a regulace. *Inmat 51- měřič průtoků a tepla*. [online]. 2009, aktualizované 14.4. 2009 [cit. 2009-05-10].

Dostupný z URL:<<http://www.jsp.cz/showdoc.do?docid=1929>>

[13] Firma OMEGAeng. *ISA1XL-teplotní čidlo*. [online]. 2009, aktualizované 15.4. 2009 [cit. 2009-05-10].

Dostupný z URL:< <http://www.omegaeng.cz/shop/tsc.html>>

[14] Server WIKIPEDIA. *Popis titanu a argonu*. [online]. 2009, aktualizované 16.4. 2009 [cit. 2009-05-10].

Dostupný z URL:<<http://www.omegaeng.cz/shop/tsc.html>>

Seznam příloh

Příloha I – tepelné technické parametry oceli, mědi, titanu a vody

1. Tepelné parametry oceli

| T [°C] | c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] | E [MPa] | ρ [$kg \cdot m^{-3}$] |
|-------------|---|------------------|---------------------------------|
| 0 | 440 | $2,1 \cdot 10^5$ | 7860 |
| 20 | 452 | | |
| 100 | 486 | | |

2. Tepelné technické parametry mědi

| T [°C] | λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] | c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] | E [MPa] | ρ [$kg \cdot m^{-3}$] |
|-------------|--|---|------------------|---------------------------------|
| 0 | 395,42 | 379 | | 8900 |
| 20 | | 383 | $1,1 \cdot 10^5$ | |
| 100 | 391,93 | 396 | | |
| 200 | | 406 | | |
| 300 | 381,46 | 416 | | |

3. Tepelné technické parametry titanu

| T [°C] | λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] | c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] | E [MPa] | ρ [$kg \cdot m^{-3}$] | L [$J \cdot kg^{-1}$] |
|-------------|--|---|-------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 20 | 21,9 | 611 | $1,16 \cdot 10^5$ | 4509 | 8900 |
| 100 | | 612 | | | |
| 200 | | 629 | | | |
| 300 | | 654 | | | |
| 1668 | | | | 4110 | 580 |

4. Tepelné technické parametry vody

| T [°C] | λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹] | c_p [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | η [Pa · s] | ρ [kg · m ⁻³] |
|-------------|---|--|--------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0,551 | 4222 | 0,001788 | 999,941 |
| 20 | 0,599 | 4183 | 0,001004 | 998,205 |
| 40 | 0,635 | 4174 | 0,0006533 | 992,22 |
| 60 | 0,659 | 4179 | 0,0004699 | 983,2 |
| 80 | 0,674 | 4195 | 0,0003551 | 971,79 |
| 100 | 0,683 | 4220 | 0,0002825 | 958,35 |

5. Legenda

E [MPa].....modul pružnosti v tahu

T [°C].....teplota

L [J · kg⁻¹].....skupenské teplo tavení

c_p [J · kg⁻¹ · K⁻¹].....měrná tepelná kapacita

λ [W · m⁻¹ · K⁻¹].....součinitel prostupu tepla

η [Pa · s].....dynamická viskozita

ν [Pa · s].....kinematická viskozita

ρ [kg · m⁻³].....měrná hmotnost (hustota)

Příloha II - Viskozita vody v závislosti na teplotě

| Teplota [°C] | Dynamická viskozita 10^{-3} [Pa.s] | Kinematická viskozita 10^{-6} m ² s ⁻¹ |
|------------------|---|---|
| 0 | 1,787 | 1,787 |
| 5 | 1,519 | 1,519 |
| 10 | 1,307 | 1,307 |
| 20 | 1,002 | 1,004 |
| 30 | 0,798 | 0,801 |
| 40 | 0,653 | 0,658 |
| 50 | 0,547 | 0,553 |
| 60 | 0,467 | 0,475 |
| 70 | 0,404 | 0,413 |
| 80 | 0,355 | 0,365 |
| 90 | 0,315 | 0,326 |
| 100 | 0,282 | 0,294 |

Příloha III - katalog firmy Böhler Thyssen Special Welding pro tvrdé pájení



Tvrde pájení instalací trubek z mědi a slitin mědi

Pro rozvody oleje, plynu, pitné vody, užitkové vody (studená voda od Ø28x1,5)

Ohřev: kyslikoacetylenový hořák s neutrálním plamenem nebo malým přebytkem acetylenu

| pájka | norma | Tprac | tavidlo | |
|----------|----------|-------|---|--|
| A 2004 | L-CuP6 | 730°C | Čistá měď bez tavidla, bronzy a mosazi s F 300 PH | |
| A 3002 V | L-Ag2P | 710°C | Čistá měď bez tavidla, bronzy a mosazi s F 300 PH | |
| A 319 | L-Ag34Sn | 710°C | F 300 PH | Typy s vysokým obsahem Ag tj. 311,319,320 se upřednostňují zejména pro kombinace a dále slitiny náchylné na přehřátí, tj. některé červené bronzy, mosazi |
| AF 319 | L-Ag34Sn | 710°C | Pájka je obalena tavidlem | |
| A 311 | L-Ag44 | 730°C | F 300 PH | |
| AF 311 D | L-Ag44 | 730°C | Pájka tence obalena tavidlem | |
| A 320 | L-Ag45Sn | 670°C | F 300 PH | |
| AF 320 | L-Ag45Sn | 670°C | Pájka je obalena tavidlem | Typ 311 je určen pro tupé spoje |

Měkké pájení instalací trubek z mědi a slitin mědi

Pro rozvody teplé i studené vody, topení do 110°C a chlazení (u A 611 a AP 654/21 až do -200°C)

Ohřev: kyslikoacetylenový hořák s přebytkem acetylenu, plynový hořák, pájecí pistole, letlampa, indukční ohřev

| pájka | norma | Tprac | tavidlo |
|-----------|---------|-----------|---|
| A 611 | L-SnAg5 | 221-240°C | F 600 C (univerzální), F 600 CR (speciálně pro fitinky) |
| A 644 | L-SnCu3 | 230-250°C | F 600 C (univerzální), F 600 CR (speciálně pro fitinky) |
| AP 654/21 | L-SnAg5 | 221-240°C | Pájecí pasta, pro vyplnění větší spáry možno přidat tyčku A 611 |
| AP 644/21 | L-SnCu3 | 230-250°C | Pájecí pasta, pro vyplnění větší spáry možno přidat tyčku A 644 |

Příloha IV - rozměry měděných trubek

Měděné trubky kruhové tažené



| Cu trubky tažené - průměr 6 x 1 a 2 140 x 10 | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| rozměr Ø (mm) | rozměr s (mm) | | | | | | | | | |
| | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | |
| 6 | 0,140 | 0,150 | | | | | | | | |
| 8 | 0,150 | 0,272 | | | | | | | | |
| 10 | 0,202 | 0,300 | | | | | | | | |
| 12 | 0,307 | 0,440 | | | | | | | | |
| 14 | 0,393 | 0,524 | | | | | | | | |
| 16 | 0,419 | 0,600 | 0,702 | | | | | | | |
| 18 | 0,475 | 0,662 | 0,804 | | | | | | | |
| 20 | 0,531 | 0,776 | 1,000 | 1,223 | | | | | | |
| 25 | 0,585 | 1,200 | 1,572 | 1,844 | | | | | | |
| 28 | 1,111 | 1,403 | 1,702 | 2,000 | | | | | | |
| 32 | 1,279 | 1,677 | 2,061 | 2,431 | | | | | | |
| 36 | 1,446 | 1,900 | 2,340 | 2,767 | 3,170 | | | | | |
| 38 | 1,530 | 2,072 | 2,480 | 2,904 | 3,374 | | | | | |
| 40 | 1,614 | 2,124 | 2,620 | 3,102 | 3,570 | 4,024 | | | | |
| 42 | 1,698 | 2,230 | 2,700 | 3,270 | 3,790 | 4,240 | | | | |
| 45 | 1,823 | 2,403 | 2,960 | 3,521 | 4,050 | 4,583 | 5,093 | | | |
| 50 | 2,003 | 2,683 | 3,310 | 3,940 | 4,540 | 5,142 | 5,722 | 6,280 | | |
| 55 | 2,205 | 3,010 | 3,730 | 4,443 | 5,135 | 5,813 | 6,476 | 7,126 | | |
| 63 | 2,570 | 3,400 | 4,227 | 5,030 | 5,820 | 6,595 | 7,357 | 8,104 | | |
| 70 | | 3,801 | 4,716 | 5,617 | 6,504 | 7,370 | 8,227 | 9,082 | | |
| 80 | | 4,380 | 5,415 | 6,495 | 7,453 | 8,490 | 9,495 | 10,490 | | |
| 90 | | | 6,113 | 7,294 | 8,461 | 9,613 | 10,752 | 11,877 | | |
| 100 | | | | 8,812 | 10,132 | 11,430 | 12,710 | 13,974 | | |
| 110 | | | | | 10,417 | 11,840 | 13,267 | 14,672 | | |
| 125 | | | | | | 13,804 | 15,520 | 17,194 | 18,799 | |
| 130 | | | | | | | 14,085 | 15,763 | 17,490 | |
| 140 | | | | | | | | 15,203 | 17,040 | 18,864 |

Příloha V - výkresová dokumentace

[1] BP-PUS077-00

[2] BP-PUS077-01

